



WORKING PAPER

AGUA Y DESARROLLO SOSTENIBLE

ISBN: 978-958-5471-98-6



UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
PRIMER CLAUSTRO UNIVERSITARIO DE COLOMBIA
T U N J A



WORKING PAPER

AGUA Y DESARROLLO SOSTENIBLE

COMPILADOR-EDITOR

Melquisedec Cortés Zambrano

AUTORES

Melquisedec Cortés Zambrano

Helmer Edgardo Monroy González

Carlos Andrés Caro Camargo

Ernest Bladé i Castellet

David Gerónimo Soler

Katerin Sabrina Romero

William Duvan Vanegas

Héctor Mauricio Sánchez Abril

Mónica Yineth Lara Pérez

Manuel Orlando Hernández Rivera

William Ricardo Mozo Moreno

Nelyda Lorena Quinchanegua Pineda

ISBN: 978-958-5471-98-6



WORKING PAPER. ISBN: 978-958-5471-98-6
Compilador-Editor: Melquisedec Cortés Zambrano
77 páginas.

El producto cumple con el proceso de evaluación a
doble ciego.

Comité editorial

Fr. Álvaro José ARANGO RESTREPO, O.P.
Rector

Fr. Omar Orlando SANCHEZ SUÁREZ, O.P.
Vicerrector Académico

Fr. Héctor Mauricio VARGAS RODRÍGUEZ, O.P.
Vicerrector administrativo y Financiero

María Ximena ARIZA GARCÍA
Directora Ediciones Usta Tunja

Sandra Consuelo DÍAZ BELLO
Directora Unidad de Investigación e Innovación

Juan Carlos CANOLES VÁSQUEZ
Director Centro de Recursos para el Aprendizaje y la Investigación

Primera edición, 2021

ISBN: 978-958-5471-98-6

Diseño: Búhos Editores Ltda.

Todos los derechos reservados conforme a la ley. Se
permite la reproducción citando fuente.

El pensamiento que se expresa en esta obra, es exclusiva
responsabilidad de los autores y no compromete la
ideología de la Universidad Santo Tomás.

Ediciones Usta
Universidad Santo Tomás
2021



Departamento Ediciones Usta Tunja
Universidad Santo Tomás Seccional Tunja

*Queda prohibida la reproducción parcial o total de este libro por cualquier proceso reprográfico
o fónico, especialmente por fotocopia, microfilme, offset o mimeógrafo.
Ley 23 de 1982.*

Contenido

Título al compilado: AGUA Y DESARROLLO SOTENIBLE	5
--	---

Evaluación hidráulica de rejillas de sumidero mediante investigación numérica.....	7
---	---

*Helmer Edgardo, Monroy-González
Melquisedec, Cortés-Zambrano*

Seguimiento a la administración del recurso hídrico en cuencas rurales	15
---	----

*Carlos Andrés Caro Camargo
Ernest Bladé Castellet
David Gerónimo Soler*

Aplicación de un modelo a escala reducida para determinar la eficiencia de rejillas instaladas en sumideros de calzada existentes en el Barrio Santa Inés de la ciudad de Tunja.....	19
--	----

*Melquisedec, Cortés-Zambrano
Katerin Sabrina Romero
William Duvan Vanegas*

Uso del recurso hídrico en construcción de carreteras y sus impactos ambientales.....	28
--	----

Héctor Mauricio Sánchez Abril

SWMM Software Applicationn for Water Quality Modeling in Urban Areas. Case Study: Santa Ines District - Tunja. 35

Mónica Yineth Lara Pérez
Melquisedec, Cortés-Zambrano

Localización óptima de relleno sanitario aplicando técnicas multicriterio en sistemas de información geográfica (SIG) 46

Manuel Orlando Hernández Rivera

Biosólido de plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) en la fabricación de ladrillos..... 56

William R. Mozo-Moreno
Melquisedec, Cortés-Zambrano

Impactos territoriales y ambientales en terminales de carga en Colombia 60

Héctor Mauricio Sánchez Abril

Modelización hidráulica y de calidad del agua del drenaje urbano en el distrito Altagracia Tunja- Boyacá. 69

Nelyda Lorena Quinchanegua Pineda
Melquisedec, Cortés-Zambrano

AGUA Y DESARROLLO SOSTENIBLE

PRESENTACIÓN

La IX Jornada de Actualización en Recursos Hídricos de la Universidad Santo Tomás Seccional Tunja pretende ser un encuentro para profesionales y proporcionar una visión actual y aplicada sobre los aspectos relacionados con el manejo sostenible de los recursos hídricos que puedan aplicarse en la práctica profesional del Ingeniero Civil y de otros profesionales.

Esta Jornada se celebra anualmente en la ciudad de Tunja desde el año 2007. Este año 2020, celebramos la IX versión. Dada la situación sanitaria actual, la Jornada se desarrolló de forma online con el propósito de facilitar la asistencia a la misma.

Este evento genera espacios académicos de reflexión y debate en torno al conocimiento científico y las soluciones prácticas a la sostenibilidad del recurso hídrico. De esta manera, en la jornada se socializaron investigaciones relacionadas con la solución de problemáticas asociadas al recurso hídrico como son: agua y ambiente, agua y salud, tecnología e instrumentación para el agua, tratamiento y depuración del agua, planificación y gestión de recursos hídricos urbano, y que están a la vanguardia del manejo de dicho recurso a nivel mundial.

Es importante destacar que es importante destacar que el área de Hidroambiental y el Semillero de Investigación Manejo Sostenible de Materiales y Recursos Hidroambientales MSMRHA participan como organizadores de la IX Jornada de Actualización en Recursos Hídricos;

modalidad virtual, la cual se llevó a cabo los días 23 y 24 de septiembre de 2020 y que contó con la presencia de investigadores de gran prestigio nacional e internacional, generado un espacio para gestar o fortalecer vínculos entre investigadores e instituciones, además de ser una oportunidad para el intercambio de experiencias de investigación, generación de alianzas estratégicas interinstitucionales, no solo con universidades y centros de investigación sino también dando cabida a la vinculación de empresas que fomentan el conocimiento aplicado.

El liderazgo institucional en calidad de organizadores del evento, estuvo a cargo del Profesor Melquisedec Cortés Zambrano, Coordinador del Área de Hidroambiental de Facultad de Ingeniería Civil, correo: melquisedec.cortes@usantoto.edu.co.

Evaluación hidráulica de rejillas de sumidero mediante investigación numérica

Helmer Edgardo, Monroy-González ^a & Melquisedec, Cortés-Zambrano ^a

^a Facultad de ingeniería civil, Universidad Santo Tomás, Tunja, Colombia.

helmer.monroy@usantoto.edu.co; melquisedec.cortes@usantoto.edu.co

Recibido: Fecha, día, 2020. Artículo revisado: Fecha, día, 2020. Aceptado: Fecha, día, 2020.

Abstract

Nine out of ten disasters are related to water and floods, constituting one of the main causes of climate-related displacement. Sewer inlet structures, such as Grate inlets, are vital components in the urban drainage system and play a determining role in the occurrence and extent of urban stormwater flooding. This proposal focuses on its study and hydraulic evaluation through numerical research, of different types of bottom lateral grate inlets. The commercial code Flow3D is used for simulations, to create real-scale models, according to the types of grates established in Tunja city urban drainage system. The results demonstrate the ability of numerical model to study the hydraulic behavior and to predict its efficiency in different geometric road arrangements, and it tie in with the theoretical proposals the other investigations.

Keywords: Grate inlet; Computational Fluid Dynamic (CFD); Drainage efficiency; 3D modelling.

Resumen

Nueve de cada diez desastres se relacionan con el agua y las inundaciones, constituyéndose en una de las principales causas de desplazamientos relacionados con clima. Las estructuras de entrada de alcantarillado, como Sumideros, son componentes vitales en el sistema de drenaje urbano y tienen un papel determinante en la ocurrencia y extensión de inundaciones pluviales urbanas. Esta propuesta se enfoca en el estudio y evaluación hidráulica mediante investigación numérica, de diferentes tipos de rejillas laterales de fondo. El solucionador Flow3D es usado para las simulaciones numéricas, creando modelos a escala real, de acuerdo a las tipologías de rejillas encontradas en el sistema de drenaje urbano de la ciudad de Tunja. Los resultados demuestran la habilidad del modelamiento numérico para estudiar el comportamiento hidráulico de los sumideros, predecir la eficiencia de las rejillas de entrada en diversas configuraciones geométricas viales y se ajustan a formulaciones empíricas propuestas en otras investigaciones.

Palabras clave: Rejilla de fondo, Dinámica de fluidos computacional (DFC); Eficiencia de drenaje; modelamiento 3D.

1. Introducción

Nueve de cada diez desastres se relacionan con el agua y las inundaciones, constituyéndose en una de las principales causas de desplazamientos relacionados con clima [1]. En las ciudades, la problemática se acentúa con el crecimiento demográfico, el desarrollo económico y la rápida urbanización [2].

Las estructuras de entrada de alcantarillado, como Sumideros, son componentes vitales en el sistema de drenaje urbano y tienen un papel determinante en la ocurrencia y extensión de inundaciones pluviales urbanas [3, 4]; elementos que muchas veces son pasados por alto en modelos de drenaje [5].

A nivel internacional, varias aproximaciones tanto numéricas como físicas vienen siendo desarrolladas con el fin de determinar la eficiencia de este tipo de estructuras hidráulicas [6–12]. Estos trabajos han demostrado las habilidades de la dinámica de fluidos computacional tridimensional, como laboratorio virtual para evaluar y validar la eficiencia en la intercepción del flujo de entrada en sumideros, para diferentes configuraciones.

Este documento presenta los avances en la evaluación hidráulica de rejillas de sumidero mediante investigación numérica tridimensional, llevada a cabo sobre algunas tipologías de rejillas laterales de fondo que suelen encontrarse en la ciudad de Tunja. Esto como respuesta a la necesidad de dar respuesta encaminada a la gestión de los recursos hídricos, en la búsqueda de adaptación y resiliencia a una región caracterizada por vulnerabilidades y riesgos altos, y alto

potencial de adaptativo del hábitat humano e infraestructura [13].

2. Modelo experimental

La campaña experimental fue desarrollada por Chaparro Andrade & Abaunza Tabares [14], quienes construyeron un prototipo físico a escala reducida, que representaba un carril de 2.75m de ancho y 4.0m de longitud. Sobre esta plataforma se ensayaron once tipologías de rejillas laterales de fondo de la ciudad de Tunja, manteniendo la pendiente transversal fija y variando la pendiente longitudinal. El montaje se realizó en el canal de pendiente variable del laboratorio de Hidráulica de la Universidad Santo Tomás, seccional Tunja, midiendo el caudal interceptado con un vertedero triangular en V y un limnómetro.

Estas pruebas comprendieron la combinación de diferentes pendientes longitudinales $IX = 1.0, 1.5$ y 2.0% , manteniendo la pendiente transversal $IL = 1.0\%$ y un caudal $Q = 34.1L/s$, para cada una de las tipologías de rejillas de fondo mencionadas.



Figura 1. Modelo físico de campaña experimental. Fuente: [14].



3. Modelo numérico hidrodinámico

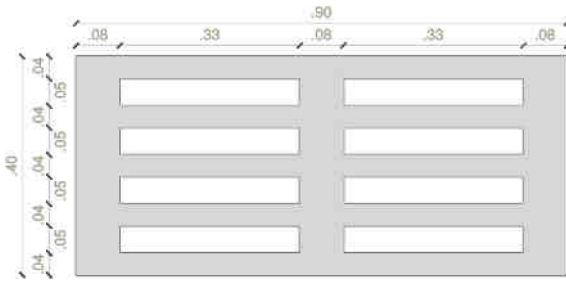


Figura 2. Rejilla tipo 1, ensayada en FLOW-3D® [15]
Fuente: Los autores.

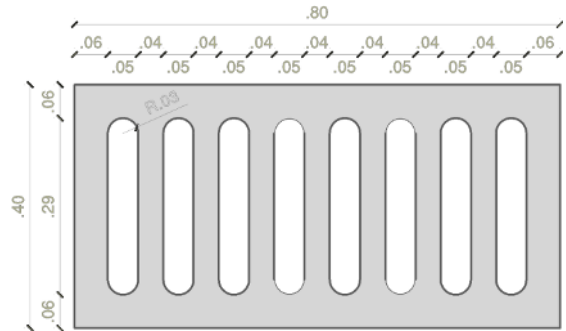


Figura 3. Rejilla tipo 2, ensayada en FLOW-3D® [15]
Fuente: Los autores.

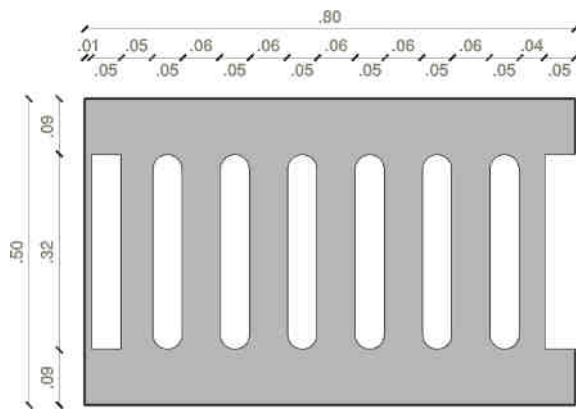


Figura 4. Rejilla tipo 3, ensayada en FLOW-3D® [15]
Fuente: Los autores.

Para las simulaciones numéricas, se mantuvo la misma configuración del modelo experimental, probando los tres prototipos de rejilla de fondo mostrados en las Fig. 2-4

y combinación de pendientes, para caudales $Q = 24, 34, 44, 100, 200$ y 300 L/s, para un total de 54 modelos; con el fin de obtener un rango amplio de eficiencias buscando la comparación con algunas investigaciones de referencia.

3.1 Formulación matemática

El solucionador FLOW-3D® [15] fue usado para las simulaciones numéricas, creando modelos a escala real de acuerdo a las tipologías de rejillas de fondo. El movimiento del fluido se evaluó con el enfoque numérico tridimensional de Reynolds Promediado para las ecuaciones de Navier-Stokes, para resolver las ecuaciones de continuidad y momento [16], ecuación (1) y ecuaciones (2) – (4).

$$V_F \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u A_x) + R \frac{\partial}{\partial y}(\rho u A_y) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho u A_z) + \xi \frac{\rho u A_x}{x} = R_{DIF} + R_{SOR} \quad (1)$$

Donde V_F es la fracción de volumen abierto al flujo, ρ es la densidad del fluido, R_{DIF} es la difusión turbulenta, R_{SOR} es el termino de fuente de masa.

Los componentes de velocidad (u , v , w) están en direcciones coordenadas (x , y , z) o (r , R_{SOR} , z). A_x es el fraccional de área abierto al flujo en la dirección x , A_y y A_z son similares áreas fraccionales para fluir en las direcciones y y z , respectivamente.

Para las componentes de velocidad del fluido (u , v , w) en las tres direcciones coordenadas, las ecuaciones que representan el movimiento son las ecuaciones de Navier-Stokes con algunos términos adicionales, se presentan en las ecuaciones (2) – (4)

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial u}{\partial x} + v A_y R \frac{\partial u}{\partial y} + w A_z \frac{\partial u}{\partial z} \right\} - \xi \frac{A_y v^2}{x V_F} \\ = -\frac{1}{p} \frac{\partial p}{\partial x} + G_x + f_x - b_y \\ - \frac{R_{SOR}}{p V_F} (u - u_w - \delta u_s) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial v}{\partial x} + v A_y R \frac{\partial v}{\partial y} + w A_z \frac{\partial v}{\partial z} \right\} + \xi \frac{A_y u v}{x V_F} \\ = -\frac{1}{p} \left(R \frac{\partial p}{\partial x} \right) + G_y + f_y - b_y \\ - \frac{R_{SOR}}{p V_F} (v - v_w - \delta v_s) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial w}{\partial x} + v A_y R \frac{\partial w}{\partial y} + w A_z \frac{\partial w}{\partial z} \right\} \\ = -\frac{1}{p} \frac{\partial p}{\partial z} + G_z + f_z - b_z \\ - \frac{R_{SOR}}{p V_F} (w - w_w - \delta w_s) \end{aligned} \quad (4)$$

En estas, G_x , G_y y G_z son aceleraciones de cuerpo, f_x , f_y y f_z son aceleraciones viscosas, b_x , b_y y b_z son pérdidas de flujo en medios porosos o a través de placas deflectoras porosas, y los últimos términos consideran la inyección de masa en una fuente representada por un componente geométrico.

El termino $U_w = (u_w, v_w, w_w)$ en las ecuaciones (2) – (4), es la velocidad del componente fuente, que generalmente no será cero para una fuente de masa en un Modelo General de Objetos en Movimiento y $U_s = (u_s, v_s, w_s)$ es la velocidad del fluido en la superficie de la fuente en relación con la fuente misma.

Para resolver lo descrito anteriormente, se definió el término de gravedad en el eje z con los valores de $9.81m/s^2$, utilizando el método de primer orden. El parámetro de gravedad en la dirección x y y fue cambiado de acuerdo a la inclinación longitudinal y transversal de la plataforma, para cada configuración de pendiente de estudio.

3.2 Dominio de calculo

Para la simulación numérica tridimensional, se generaron geometrías en formato STL, cada una de las cuales fueron importadas y luego comprobadas, usando la herramienta qAdmesh.

Se definió un sistema coordenado cartesiano, subdividiendo el dominio en tres mallados estructurados con elementos hexaédricos cúbicos, uno general que corresponde a la plataforma virtual, uno anidado alrededor de cada rejilla lateral de fondo a evaluar manteniendo una relación 2:1 y otro contiguo al anidado con el que se detalla el flujo captado por la rejilla de fondo.

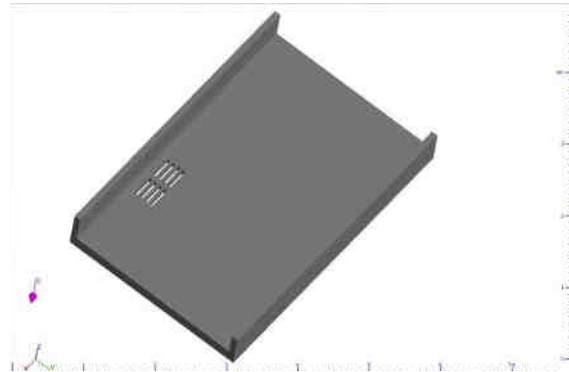


Figura 5. Ejemplo de geometría de prueba en FLOW-3D® [15] Fuente: Los autores.

3.3 Condiciones de frontera y otras configuraciones

Se definieron las condiciones de frontera, estableciendo una entrada en términos de tasa de volumen de fluido, presión específica a presión atmosférica, y dos salidas, una para el caudal captado bajo la rejilla de fondo y otra para para el caudal no captado.

Como condición inicial se definió una condición de fracción de fluido de cero para representar la plataforma llena de aire,



permitiendo el llenado de la misma hasta lograr una condición de estado permanente, empleando un valor de rugosidad de 0.3mm .

La evaluación de la advección del momento se realizó, utilizando la precisión de primer orden y se consideró la integración entre agua y aire en las simulaciones, mediante el uso del método VOF (Volumen de Fluido) para flujos multifásicos.

3.4 Sensibilidad al mallado y modelos de turbulencia

Con el fin de definir un tamaño de mallado óptimo computacionalmente, se estimó la profundidad de flujo con condiciones de flujo uniforme a la entrada y revisaron las geometrías de las diferentes tipologías de rejillas. Producto de ello, se definieron dos tamaños de malla: uno de 2cm para el subdominio general o de plataforma y de 1cm para el subdominio anidado y de salida de flujo a través de la rejilla.

Una vez definido el mallado, se realizaron algunas simulaciones de prueba asumiendo condiciones de flujo Laminar y usando modelos de turbulencia como el $k-\epsilon$. Sin embargo, se evidenciaron diferencias con los fenómenos hidráulicos observados en laboratorio y dificultades para la convergencia de las simulaciones, en más de un 1000% los tiempos de cálculo. Por tanto, se realizaron las simulaciones con el modelo de turbulencia del grupo de Renormalización RNG, ya que, de acuerdo a [4–8] es el método más estable y comúnmente usado, para el análisis de flujo de superficie libre.

4. Resultados y análisis

Como se observa en la Fig. 6, los resultados de las simulaciones para las tipologías de rejilla de fondo de las Fig. 2-4, se aproximan y reproducen la mayoría de los fenómenos y patrones de flujo observados en la campaña experimental física llevada a cabo por [14].

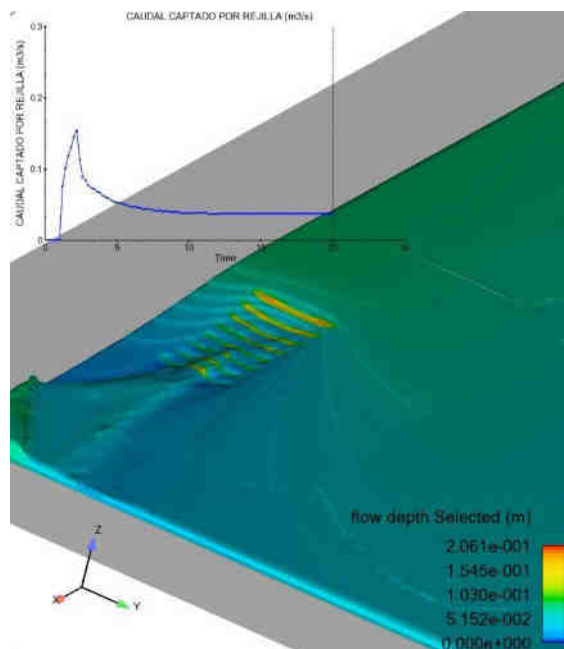


Figura 6. Ejemplo de resultados de simulación de un tipo de rejilla de fondo, en FLOW-3D® [15]

Fuente: Los autores.

Patrones de drenaje, profundidades de flujo, funcionamiento como vertedero lateral, zonas de recirculación del flujo y otros específicos, como zonas de resaltos y frentes secos son reproducidos. Como se observa en la Fig. 7.

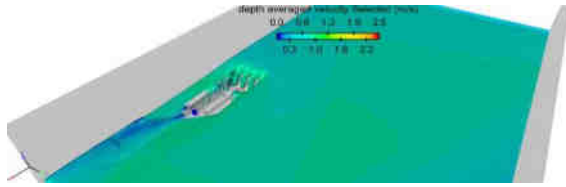


Figura 7. Comparación entre resultados obtenidos durante experimentación física en prototipo y resultados de simulación con FLOW-3D® [15].
Fuente: Los autores.

Como se observa en la Fig. 8, la investigación numérica de las rejillas de fondo, permitió conocer la evolución de la capacidad de captación de cada geometría y evaluarla eficiencia hidráulica de las tres tipologías estudiadas, para las combinaciones de pendiente y relaciones de profundidad caudal obtenidos, bajo condiciones de flujo permanente.

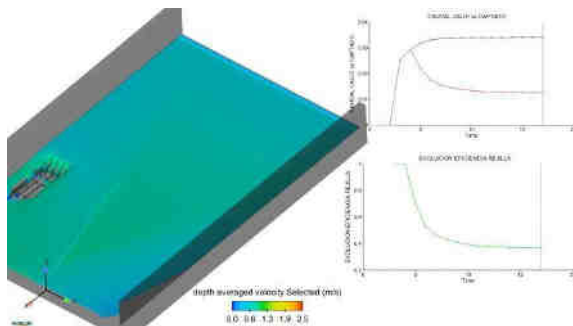


Figura 8. Caudal de calle versus caudal captado (arriba), Evolución de eficiencia hidráulica en el tiempo para una condición de caudal, obtenidos con FLOW-3D® [15]
Fuente: Los autores.

Con el fin de comparar y verificar los resultados obtenidos, se construyeron las curvas empíricas para estimar la eficiencia hidráulica de entrada para las diferentes tipologías de rejillas consideradas, de acuerdo a lo propuesto por [18], basándose en las características geométricas y las configuraciones de pendientes longitudinales.

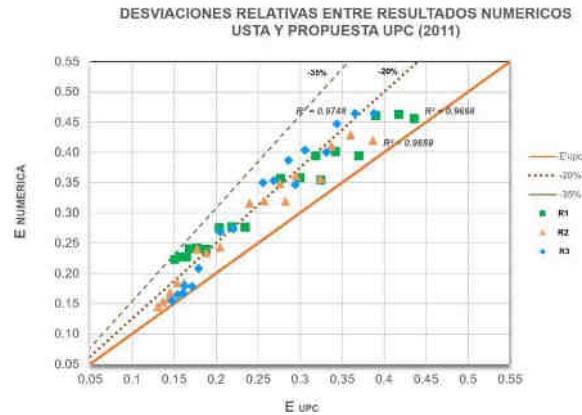


Figura 9. Desviaciones relativas entre eficiencia numérica y eficiencia empírica de acuerdo a lo propuesto por [18].
Fuente: Los autores.

La Fig. 9 presenta la Eficiencia Numérica contra la Eficiencia Empírica propuesta por [18], en ella se han incluido los límites de errores de -20% y -35% (máximo). Los resultados obtenidos exhiben una correlación positiva, con $R^2=0.97$ para las tres tipologías de rejillas ensayadas.

Los resultados demuestran la habilidad del modelamiento numérico para estudiar el comportamiento hidráulico de los sumideros, predecir la eficiencia de las rejillas de entrada en diversas configuraciones geométricas viales y se ajustan a formulaciones empíricas propuestas en otras investigaciones. Convirtiéndose en una de las opciones de estudio y evaluación hidráulica, que favorecerán la comprensión de los fenómenos hidráulicos.

Los resultados de esta investigación, entregaran la base para la posterior calibración de los valores de estudios experimentales físicos, permitiendo formular una metodología de aproximación virtual, económica y alternativa, para los problemas de: análisis y diseño de sumideros bajo condición de flujo permanente en calles, evaluación y



determinación de eficiencias de los sistemas existentes en la ciudad (de acuerdo a los caudales captados), identificación de sectores peligrosos, vulnerables y sensibles a la inundación, evaluación de riesgos y peligrosidad para peatones en eventos de inundaciones, evaluación de efectos de hidroplaneo vehicular, entre otros.

Dando así respuesta directa a la necesidad palpable de interconectar los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), en un momento donde el agua y el saneamiento se enfrentan a una crisis, y plantea uno de los problemas más urgentes para la comunidad global.

Referencias

- [1] O. Banco Mundial, “Agua: Panorama general,” 2019. <https://www.bancomundial.org/es/topic/water/overview> (accessed Aug. 01, 2020).
- [2] I. UNDRR and I. CRED, “Pérdidas económicas, pobreza y Desastres 1998 - 2017,” Bruselas, 2018. doi: 10.12962/j23373520.v6i1.22451.
- [3] J. P. Leitão, N. E. Simões, R. D. Pina, S. Ochoa-Rodriguez, C. Onof, and A. Sá Marques, “Stochastic evaluation of the impact of sewer inlets’ hydraulic capacity on urban pluvial flooding,” *Stoch. Environ. Res. Risk Assess.*, vol. 31, no. 8, pp. 1907–1922, 2017, doi: 10.1007/s00477-016-1283-x.
- [4] J. H. Jang, C. T. Hsieh, and T. H. Chang, “The importance of gully flow modelling to urban flood simulation,” *Urban Water J.*, vol. 16, no. 5, pp. 377–388, 2019, doi: 10.1080/1573062X.2019.1669198.
- [5] M. Kleidorfer, F. Tscheikner-Gratl, T. Vonach, and W. Rauch, “What can we learn from a 500-year event? Experiences from urban drainage in Austria,” *Water Sci. Technol.*, vol. 77, no. 8, pp. 2146–2154, 2018, doi: 10.2166/wst.2018.138.
- [6] J. Tellez-Alvarez, V. Gómez, B. Russo, and J. M. Redondo, “Performance assessment of numerical modelling for hydraulic efficiency of a grated inlet,” no. 1, pp. 6–8, 2003, doi: 10.16309/j.cnki.issn.1007-1776.2003.03.004.
- [7] M. Gómez Valentin, “Hidrología urbana,” in *Hidrología Urbana*, Barcelona: Instituto Flumen, 2007, pp. 135–147.
- [8] X. Fang, S. Jiang, and S. R. Alam, “Numerical simulations of efficiency of curb-opening inlets,” *J. Hydraul. Eng.*, vol. 136, no. 1, pp. 62–66, 2010, doi: 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000131.

- [9] B. Russo, "Design of surface drainage systems according to hazard criteria related to flooding of urban areas," Universitat Politècnica de Catalunya, 2010.
- [10] M. Gómez, J. Recasens, B. Russo, and E. Martínez- Gomariz, "Assessment of inlet efficiency through a 3D simulation: Numerical and experimental comparison," *Water Sci. Technol.*, vol. 74, no. 8, pp. 1926–1935, 2016, doi: 10.2166/wst.2016.326.
- [11] J. Téllez Álvarez, M. Gómez Valentin, A. Paindelli, and B. Russo, "ACTIVIDAD EXPERIMENTAL DE I+D+i EN INGENIERÍA HIDRÁULICA EN ESPAÑA," in *Seminario 2017, Comunicaciones de las líneas prioritarias*, 2017, pp. 41–43, doi: 10.1017/CBO9781107415324.004.
- [12] J. Tellez-Alvarez, M. Gómez Valentin, and B. Russo, "Modelling of Surge Flow Through Grated Inlet," in *Advances in Hydroinformatics*, 2019, doi: 10.1007/978- 981-4451-42-0.
- [13] IDEAM, PNUD, MADS, DNP, and CANCELLERÍA, "Análisis de Vulnerabilidad y Riesgo," IDEAM, PNUD, MADS, DNP, CANCELLERÍA., Bogotá D.C., 2017.
- [14] F. G. Chaparro Andrade and K. V. Abaunza Tabares, "Importancia de los sumideros, su funcionamiento y diseño en redes de alcantarillado caso de estudio sector nororiental Tunja," Universidad Santo Tomás, 2020.
- [15] I. Flow Science, "FLOW-3D® Version 12.0 [Computer software]." Santa Fe, NM, 2019, [Online]. Available: <https://www.flow3d.com>.
- [16] I. Flow Science, "FLOW-3D® Version 12.0 Users Manual," Santa Fe, NM, 2018. [Online]. Available: <https://www.flow3d.com>.
- [17] M. Cárdenas-Quintero, L. F. Carvajal-Serna, and R. Marbello-Pérez, "Evaluación numérica tridimensional de un sumidero de reja de fondo (Three-Dimensional Numerical Assessment of Grate Inlet)," *SSRN Electron. J.*, no. November, 2018, doi: 10.2139/ssrn.3112980.
- [18] M. Gómez and B. Russo, "Methodology to estimate hydraulic efficiency of drain inlets," *Proc. Inst. Civ. Eng. Water Manag.*, vol. 164, no. 2, pp. 81–90, 2011, doi: 10.1680/wama.900070.

2

Seguimiento a la administración del recurso hídrico en cuencas rurales

Carlos Andrés Caro Camargo ^a, Ernest Bladé i Castellet ^b & David Gerónimo Soler ^c

^a Facultad de ingeniería civil, Universidad Santo Tomás, Tunja, Colombia.
carlos.caroc@usantoto.edu.co

^b Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, España. ernest.blade@upc.edu

^c Facultad de ingeniería civil, Universidad Santo Tomás, Tunja, Colombia.
david.soler@usantoto.edu.co

Recibido: Fecha, día, 2020. Artículo revisado: Fecha, día, 2020. Aceptado: Fecha, día, 2020.

Abstract

A case of application of monitoring tools is presented in reference to the application of the GWI index (Green watershed index), for control and management of rural watersheds. The index obtained and already used in some basins of Colombia specifically within the department of Boyacá is exposed.

Keywords: GWI index; Management of rural watersheds, Planning of water resources.

1. Introducción

Uno de los problemas más relevantes a nivel mundial y local, contextualizando a Colombia, es la mala administración del recurso hídrico. De esta manera tenemos zonas muy húmedas y zonas o regiones muy secas. La falta de gestión en referencia al aprovechamiento y conservación del recurso hídrico, hace que sea muy importante la generación de herramientas que permitan el seguimiento y optimización de los procesos de uso del recurso [1]. La mala gestión del recurso evidencia una problemática generalizada que advierte la mala gobernanza del agua predominantemente en los países latinoamericanos, donde la falta de voluntad política y la corrupción dificultan de manera importante los procesos de una buena gestión hídrica. La investigación obtuvo una metodología para la aplicación de un índice de manejo de cuencas rurales GWI (Green watershed index), que se compone de indicadores medidores de la gestión de una región, dependiendo del área de estudio. La metodología incluye el desarrollo y aplicación de una herramienta computacional que cuenta con una interfaz muy intuitiva que permite la verificación clara de los indicadores de desempeño y su seguimiento temporal como base de administración hídrica. Así mismo, se realizó una evaluación en 4 municipios del departamento de Boyacá, Colombia, obteniendo en general la ausencia de una cultura de planificación y gestión de largo plazo en referencia a los recursos hídricos y ambientales [2].

2. Formulación de indicadores de seguimiento (métodos)

La gestión de recursos hídricos en términos globales está enfocada al seguimiento de

cuencas urbanas [3][4], y para obtener un índice de seguimiento en cuencas rurales fue necesario analizar las necesidades más urgentes y objetivas en cuanto al uso de los recursos hídricos en este tipo de cuenca. Para seleccionar los indicadores más relevantes, se realiza una valoración de cada uno de ellos, observando la importancia, desarrollo e impacto generado. El mantenimiento de la infraestructura, la demanda de agua, la calidad del agua y la escasez de agua, son los factores de mayor incidencia para el índice generado [5][6]. Así, luego de una evaluación detallada de cada uno de los indicadores y de los factores que intervienen en su evaluación y ejecución, se decidió seleccionar 18 indicadores que resultan suficientes para la caracterización de una cuenca rural a partir de un abastecimiento de agua potable. Sistema [7].

2.1 Indicadores de seguimiento del Índice GWI

Los 18 indicadores base del índice GWI son: mantenimiento de la infraestructura, efectividad general de la planificación, vulnerabilidad hídrica, riesgo hídrico, estrés hídrico, huella hídrica, autosuficiencia hidro-ambiental, eficiencia en uso y sostenibilidad hídrica, biodiversidad, eficiencia ambiental, tratamiento del agua, atractivo, capital humano, participación ciudadana, aspectos económicos, modo de manejo del cambio climático, calidad de la información y control, y control de la corrupción. Es importante mencionar que cada uno de los indicadores mencionados responde de manera diferencial según el tipo de cuenca en estudio y de incluso, políticas gubernamentales del país al que pertenece la cuenca.



2.2 Criterios de calificación de los indicadores.

Cada uno de los indicadores es evaluado de 1 a 10 de acuerdo al grado de desarrollo en el momento de ser evaluado. De esta manera, si es una cuenca que ha tenido un control y avance importante en un determinado aspecto referente a el cuidado y la conservación de los recursos hidro ambientales, y es representado a través de uno de los indicadores, la asignación cuantitativa de dicho indicador será de 10 o un valor cercano a 10 de acuerdo al grado de desarrollo, por el contrario, si el grado de desarrollo en ese indicador representa ausencia de control o seguimiento, la calificación tenderá a 1. Adicionalmente, cada uno de los indicadores, cobra mayor o menos importancia de acuerdo a la zona o región donde se está calculando el índice GWI. De esta manera, por ejemplo, el control de la corrupción podría tener una mayor importancia en países latinoamericanos respecto a un país del norte de Europa. Esa mayor o menor importancia se califica o se mide a través de un coeficiente de peso, que multiplica a cada indicador (f).

$$GWI = \frac{\sum_{i=1}^n F_i * P_i}{\sum P_i} \quad (1)$$

3. Acompañamiento en el uso del índice

Si bien el índice GWI presenta aún una etapa de pruebas en diferentes municipios de Colombia, es importante mencionar que algunos de los alcaldes consultados respecto a la posibilidad de usar el índice dentro de sus jurisdicciones, opinaron estar de acuerdo respecto a incorporar este tipo de herramientas que permiten un seguimiento continuo de diferentes aspectos hidro-ambientales de una región o cuenca. Sin embargo, aclararon que el acceso al desarrollo del índice en cual-

quiera de los municipios, depende en gran medida de lograr que el uso del método sea muy amigable. Por ese motivo se generó una herramienta computacional que permite de una manera muy sencilla y ágil, tener la posibilidad de lograr seguimientos claros y un control real en el tiempo en referencia a cada indicador o componente del índice GWI. La herramienta está desarrollada en Visual Basic y su interface es muy intuitiva.

4. Resultados y análisis

Dado que para cada indicador es necesario proponer una metodología definida que involucre los diferentes parámetros establecidos en el Reglamento Técnico del sector de agua potable 2017, así como las diferentes condiciones de la cuenca rural disponible para el abastecimiento de los recursos hídricos, Es necesario contar con entidades que permitan el suministro de información a través de herramientas como el censo, que permite tipificar la población atendida. Asimismo, las visitas de campo y la recolección de datos (in-situ) permiten realizar inspecciones visuales y mediciones de la situación hidráulica actual de algunas estructuras y la comparación según la concesión dada previamente. Para ello, es importante tener en cuenta las condiciones reales de la población total, para obtener datos asertivos debido al grado de complejidad de la caracterización de un área de estudio específica en la que las condiciones varían según el manejo dado para la planificación y ejecución de obras dentro del suministro de agua potable en una comunidad rural.

Se debe tener en cuenta que la implementación de los 18 indicadores mencionados puede tener una lectura de seguimiento más

clara, si se aplican en regiones o municipios con estructuras de gobernanza evidentes. Para otras situaciones o contextos, este protocolo no tendría el mismo efecto de control o seguimiento. Los resultados en los municipios donde la mayoría de los casos incluyen un mayor número de cuencas rurales respecto a las urbanas, arrojan una evidente falta de control en términos generales de participación comunitaria y normativas o

políticas de seguimiento y control de los recursos. Gran subjetividad es expuesta en algunos casos, a manera de ejemplo, en el indicador de control de la corrupción, donde se evidencia desde la percepción de la comunidad una de las mayores preocupaciones en general en Colombia, y aun así, es el ítem mejor valorado en la mayoría de los estudios de caso.

5. Referencias

- [1] A. Guzmán and J. Calvo, “Planificación del recurso hídrico en América Latina y el Caribe”, Planning Water Resources in Latin America and the Caribbean, 2012, vol. 26, pp. 3–18.
- [2] C. Caro, E. Bladé, G. Soler, “Administración del recurso hídrico. Gobernanza del agua en cuencas rurales.”, Editorial Académica Española, ISBN: 978-620-0-39709-6, 2020.
- [3] C. Van Leeuwen, S. Koop and R Sjerps “City Blueprints: baseline assessments of water management and climate change in 45 cities” Environ. Dev. Sustain, 2016, vol. 18, no. 4, pp. 1113–1128.
- [4] S. Dening, “European_Green_City_Index”, Munich, Germany: Siemens AG. Retrieved from www.siemens.com/greencityindex, 2009.
- [5] Eurostat, Water Exploitation Index in Europe (Retrieved from <http://maps.eea.europa.eu>), 2016.
- [6] F. Sosa, “Exploring the risks of ineffective water supply and sewage disposal : A case study of Mexico City”, Environmental Hazards
- [7] Human and Policy Dimensions, <https://doi.org/10.3763/ehaz.2010.0016>, 2010.
- [8] UNESCO. IWRM Guidelines at River Basin Level. Part I: Principles, United Nations World Water Development Report, 2009.

3

Aplicación de un modelo a escala reducida para determinar la eficiencia de rejillas instaladas en sumideros de calzada existentes en el Barrio Santa Inés de la ciudad de Tunja

Melquisedec, Cortés-Zambrano^a, Katerin Sabrina Romero^b, William Duvan Vanegas^b

^aFacultad de Ingeniería civil, Universidad Santo Tomás, Boyacá, Colombia. melquisedec.cortes@usantoto.edu.co

^bFacultad de ingeniería civil, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Tunja, Colombia. katerin.romero01@uptc.edu.co; William.vanegas01@uptc.edu.co

Recibido: Fecha, día, 2020. Artículo revisado: Fecha, día, 2020. Aceptado: Fecha, día, 2020.

Abstract

The management of rainwater is a theme that tends to overwhelm large and small cities today. It is easy to identify when, despite there only being a slight amount of precipitation, the sewage system in a sector collapse. This is the case in the Santa Inés neighborhood in Tunja, Boyacá. There are multiple potential causes of the collapse of a sewage system, however the drains, or entrance structures to the system, were chosen as the focus point of this investigation. 11 different varieties of roadway-type drain were identified, and the efficiency of each variety was calculated through a physical scale model. Thus, it was possible to geometrically define the most adequate and efficient grate for the Santa Inés neighborhood.

Keywords: Drains, Froude number, Efficiency, Scale model

Resumen

El manejo de aguas lluvias es una temática que tiende a agobiar a las grandes y pequeñas ciudades hoy en día, cualquier ciudadano puede identificar que, en algunos casos con una cantidad leve de precipitación, el sistema de alcantarillado de algún sector colapsa; este es el caso el barrio Santa Inés de la Ciudad de Tunja – Boyacá, pero por qué ha de pasar esto. El colapso de un sistema puede generarse por múltiples causas, más en esta investigación se decidió evaluar las estructuras de entrada al sistema, los sumideros. En el caso específico del barrio Santa Inés, se identificaron sumideros de tipo calzada, pero con variedad de hasta once (11) tipos de rejillas, por lo cual, se calculó la eficiencia de cada una de ellas a través de un modelo físico a escala reducida, para así definir geométricamente la más adecuada y eficiente para el barrio Santa Inés.

Palabras clave: Sumideros, Numero de Froude, Eficiencia, Modelo a escala.

1. Introducción

En el campo de la Hidráulica se ha vuelto común emplear modelos físicos a escala reducida que permiten evaluar a detalle los fenómenos presentados en las estructuras, aportando así información confiable en el diseño y optimización de las mismas. Ante las problemáticas de inundación y colapso de la infraestructura del alcantarillado existente en las ciudades, se hace necesario la optimización de las instalaciones del drenaje urbano y con ello la comprensión de los patrones de flujo de las vías que las componen [1]. Por esto, en la investigación se buscó evaluar un método que permitiera analizar y tomar decisiones sobre la problemática social y ambiental que presentan las personas del barrio Santa Inés de la ciudad de Tunja [2], indagando de esta manera que geometría de rejilla es más eficiente para evitar el desbordamiento del sistema de aguas lluvias. Siendo así, se construyó un modelo que representaría la mitad de una calzada promedio del barrio, el cual permitiría analizar las eficiencias de cada uno de los 11 tipos de rejillas reconocidas en el sitio.

Debido a que el sistema evaluado está dominado por las fuerzas de la gravedad, se optó por diseñar el modelo a base del método adimensional de Froude. Teniendo en cuenta todos los factores de forma y las condiciones reales de la vía, se pudo establecer la relación de los distintos flujos presentes, el que escurre sobre la vía y el que es captado por los sumideros. Con este tipo de información se podría recomendar un diseño más adecuado para mejorar y optimizar el sistema de alcantarillado pluvial [3].

Por último, se resalta que este tipo de investigación funciona para evaluar la

implementación de nuevas estructuras de captación o la combinación de ellas. Varios estudios realizados anteriormente son ejemplos clave, en cada uno de ellos se evaluó mediante un modelo físico, la eficiencia de varios tipos de sumidero (Ventana, Calzada, Mixto), frente a distintas condiciones como pendiente, caudal, geometría entre otros. Con el fin de aportar información experimental al diseño u optimización de un sistema local, regional o nacional. Todos ellos desarrollados bajo los criterios de similitud. [3-11].

2. Método

Este proyecto se basó en una investigación descriptiva analítica, donde se fabricaron distintos tipos de rejillas las cuales desviaban el flujo superficial en un modelo a escala, simulando la escorrentía provocada por una precipitación en una sección de vía del sector en estudio, el agua captada caía a una cámara inferior equipada con un vertedero triangular calibrado de medición, para así poder obtener datos de variación de flujo según el tipo de rejilla implementada. Se pretendía conocer los factores que intervenían en la afectación del flujo y analizar cuál sería el diseño que permitía mejor la captación

2.1 Selección de escala

La ley de similitud adoptada fue la de Froude, debido a que las fuerzas dominantes del modelo son las gravitatorias, es un flujo con superficie libre y las pérdidas por fricción son despreciables. Para el caudal la relación de escala entre el prototipo y el modelo fue la siguiente:



$$E_Q = \frac{E_{vol}}{E_t} = \frac{E_l^3}{E_l^{1/2}} = E_l^{5/2} \quad (1)$$

Las condiciones reales de la vía que se modelo tienen un ancho de carril de 2,4 metros y un caudal de escorrentía de 43,5 lps. El ancho del canal de pruebas es de 30,9 cm lo que limitó la base del modelo que correspondería a 29,9 cm (por el espesor del material de elaboración). Dando esto como tal la relación geométrica o escala de 1 a 8.

$$E_l = \frac{L_{real}}{L_{modelo}} = \frac{240}{29,9} = 8 \quad (2)$$

Según esto y la ley de similitud de Froude, la escala de caudal fue de,

$$E_Q = E_l^{5/2} = 8^{5/2} = 181 \quad (3)$$

Conociendo la relación de caudales se pudo averiguar con que caudal manejarse el modelo para garantizar las condiciones reales de la vía.

$$E_Q = \frac{Q_{real}}{Q_{modelo}} \quad (4)$$

$$Q_{modelo} = \frac{Q_{real}}{E_Q} = \frac{43,5}{181} \text{ lps} = 0,240 \text{ lps} \quad (5)$$

Como el caudal del modelo era demasiado pequeño para garantizarlo con los equipos automáticos del laboratorio, se recurrió de forma mecánica para el cálculo del flujo asumiendo así una variación en la precisión. El caudal tomado para los ensayos dio de 0,238 lps razón por la que se consideró en un rango aceptable.

2.2 Diseño del modelo de canal

Se pretendía modelar el canal donde iba estar situada la rejilla simulando un sumidero sobre una vía. Conociendo la escala de trabajo, se seleccionó como material de trabajo acrílico al 70% de pureza con un ancho de lámina de 5 mm. El diseño del modelo se hizo en AutoCAD ilustrando cada parte que lo componía. En total fueron 7 secciones, las que daban forma a la sección de vía a escala reducida.

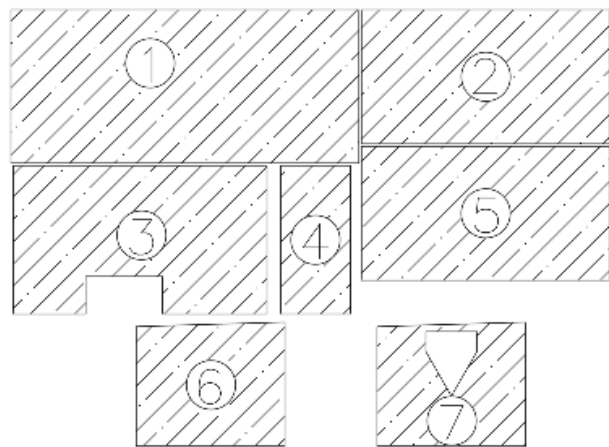


Figura 1. Secciones que componen el modelo
Fuente: Los autores

La sección uno corresponde a la base del modelo, la número dos y cinco a las paredes laterales, la número seis a la parte posterior, la número cuatro era la pantalla reductora de velocidad, la número tres era la superficie de la vía con el agujero donde iban los sumideros, y por último la sección número siete correspondería al vertedero de salida donde se calculaba el caudal interceptado por las rejillas, en su parte superior se apreciaba la inclinación que daba forma al bombeo de la vía.

2.3 Diseño del acople y de los distintos tipos de rejillas a implementar

Los sumideros se obtuvieron de una evaluación visual, los once (11) tipos presentes en la zona de estudio. Luego con las medidas reales y la escala de trabajo hallada anteriormente, se diseñaron a escala reducida y se imprimieron en 3D. Para el sostenimiento de las rejillas en el modelo se usó una especie de cuña en los bordes del orificio que servía como acople a la estructura.

2.4 Diseño de la cámara de captación y vertedero de medición

El vertedero se diseñó de forma triangular para permitir mediciones de mayor precisión con menores caudales. Se usó un ángulo de 60° de apertura y se estimó una carga máxima para el cálculo del flujo máximo.

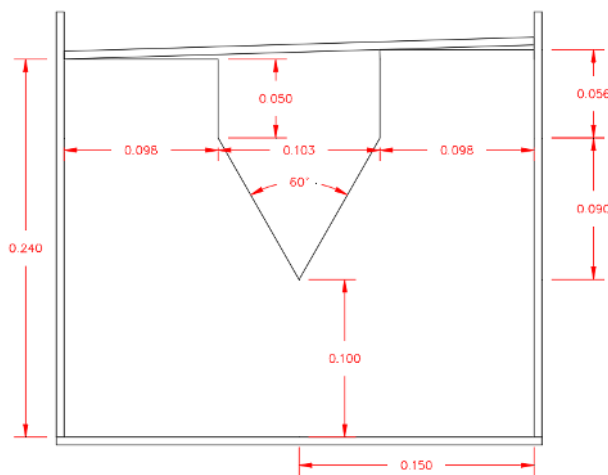


Figura 2. Dimensiones de la parte frontal del modelo. Vertedero
Fuente: Los autores

Como había limitantes de espacio, se ajustó el diseño a las dimensiones establecidas: base del canal igual a 29,9 cm y altura máxima de la estructura de 50 cm. Así se estableció una altura del vertedero de 10 cm y demás dimensiones mostradas en la figura 2. Todo esto teniendo en cuenta la afectación de la carga hidráulica por la velocidad del agua antes del vertedero y que las dimensiones del modelo estuvieran dentro de los rangos establecidos teóricamente.

Para el diseño de la pantalla disipadora de velocidad, se calcula un orificio de fondo con descarga ahogada, tal que permitiera la salida de mayor flujo al que era captado por las rejillas, así pasaría de un estado supercrítico a subcrítico, disminuyendo la velocidad del agua para no alterar de manera considerable la carga sobre el vertedero triangular (ver figura 3).

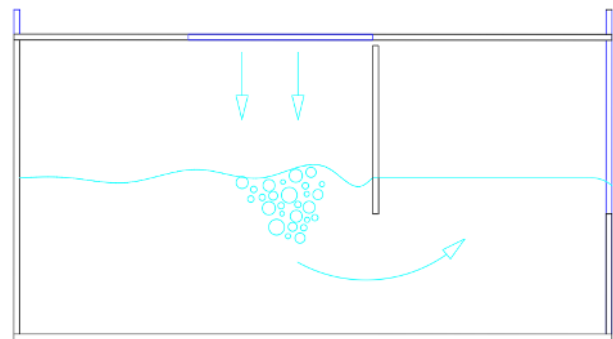


Figura 3. Comportamiento del flujo en el modelo
Fuente: Los autores

A continuación, se encuentran los distintos tipos de rejilla utilizadas impresas en 3D, así como la construcción del modelo terminado. Las rejillas son impresas a base de un material termoplástico biodegradable que al igual que el acrílico son reciclables.



Figura 4. Modelo a escala terminado

Fuente: Los autores

Tabla 1.
Levantamiento métrico de rejillas en estudio

Nº sumideros	Longitud (cm)	Ancho (cm)	Nº de barras	Nº de espacios	Material real
1	72	38	7	8	metálica
2	90	46	18	19	metálica
3	100	40	16	18	metálica
4	90	40	6	8	metálica
5	115	48	10	11	metálica
6	80	40	7	8	Plástica
7	90	42	11	10	metálica
8	70	40	9	10	metálica
9	65	40	18	20	Plástica
10	80	50	7	8	Plástica
11	55	55	9	11	metálica

Fuente: Los autores



Figura 5. Rejillas a escala

Fuente: Los autores

2.5 Toma de datos

Para el registro y toma de datos se implementó una regla de metal graduada ubicada a un costado del canal de pruebas junto al modelo, exactamente al lado del sumidero. Con esta se medía la cabeza de agua sobre el vertedero, unos centímetros antes para evitar variaciones. Los datos se registraron en una hoja de Excel donde posteriormente fueron procesados para obtener los valores de eficiencia. La calibración del vertedero se hizo mediante el método de aforo volu-

métrico, el cual consistía en medir la cantidad de agua que pasaba por este en un tiempo determinado.

El método volumétrico se usa para medir pequeños caudales, para ello se utilizó un balde calibrado con un volumen conocido, ubicado en la entrada del agua, y calculando el tiempo de llenado del mismo, se registró tres lecturas que promediadas daban el caudal aproximadamente real del flujo en el canal.

Manteniendo constante el caudal, se podía obtener distintas medidas de la carga hidráulica, y con la ecuación teórica del vertedero triangular, se hallaba el coeficiente de descarga.

Los errores sistemáticos y aleatorios no son la excepción en esta investigación, además de los factores de escala en el modelo y condiciones especiales de la zona. Todos son influyentes en el análisis, apreciación y sesgo de los datos.

$$Q_{v.T.} = Cd \frac{8}{15} \sqrt{2g} \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) H^{\frac{5}{2}} \quad (6)$$

$$Eficiencia = \frac{Caudal\ interceptado}{Caudal\ total} \quad (7)$$

3. Resultados y análisis

Evaluando los once (11) tipos de rejillas con un caudal de 0,24 lps, correspondiente a los 43,5 lps asociados a un periodo de retorno de 10 años, y una pendiente longitudinal estándar del carril de 1.5%, se observa que todas interceptan alrededor de un 60% del flujo presente en la vía (Véase figura 6). Rejillas con forma similar como geometría y dirección de los barrotes, presentan valores de eficiencia similares, pues se desarrollan dentro de un corto intervalo de 59.91% a 67.04%, tal es el caso de las rejillas identificadas con los numero uno, tres, cinco, seis, siete, nueve y diez (Véase Tabla 2). Cabe resaltar que dentro de este grupo la rejilla número tres (3), es la segunda rejilla con mejor eficiencia del estudio, pues aun cuando sus características son similares a las ya mencionadas, cuenta con una mayor longitud, por lo que el área de contacto aumenta permitiendo más captación de flujo lateral.

Tabla 2.

Rejilla #	h1 cm	h2 cm	Carga sobre el vertedero m	Caudal m³/s	Caudal lps	Eficiencia %
1	13.15	13.05	0.027	0.00016	0.155	65.21
2	13	12.95	0.026	0.00014	0.138	57.93
3	13.18	13.08	0.027	0.00016	0.160	67.04
4	12.89	12.85	0.025	0.00012	0.124	52.20
5	13.08	13	0.026	0.00015	0.147	61.65
6	13.05	13.05	0.027	0.00015	0.148	62.24
7	13	13.02	0.026	0.00014	0.143	59.91
8	12.9	12.9	0.025	0.00013	0.128	53.80
9	13	13	0.026	0.00014	0.141	59.34
10	13.07	13.05	0.027	0.00015	0.150	62.83
11	13.12	13.18	0.028	0.00016	0.162	68.28

Datos de laboratorio y eficiencia de rejillas a una pendiente longitudinal del 1,5%

Fuente: Los autores



En cuanto a las rejillas referidas con el número cuatro (4) y ocho (8), estas presentaron características especiales. La rejilla número cuatro (4) su grosor de barrotes es bastante considerable disminuyendo la superficie de contacto con el flujo, y la forma triangular de los barrotes de la rejilla ocho (8) presentan un efecto negativo en la captación del agua, obteniendo como eficiencia valores de 52.20% y 53.80 % respectivamente, los más bajos de todo el estudio.

La rejilla once (11) tiene la mayor eficiencia con un 68% del flujo captado, debido a que sus barrotes no muy gruesos están en dirección perpendicular al flujo y su longitud de orificio es mayor a las otras, aumentando el perímetro de contacto con el agua, permitiendo que la mayoría del flujo entre al sumidero.

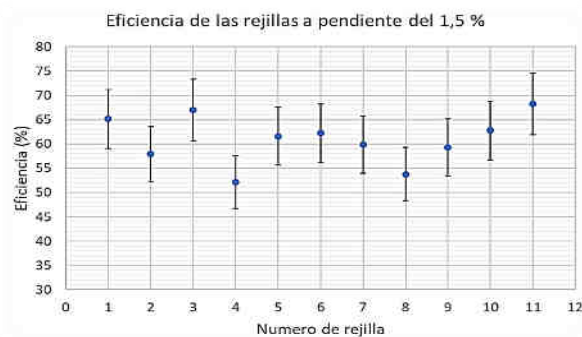


Figura 6. Eficiencia de las rejillas a pendiente del 1,5 %
Fuente: Los autores

En una segunda etapa de análisis se seleccionaron tres (3) de las once (11) rejillas en estudio, con el fin de evaluar la eficiencia ante otro escenario presentado por el cambio de pendiente longitudinal, se eligió la rejilla número uno (1) por ser la geometría más presente

dentro del barrio Santa Inés, la numero cuatro (4) por ser la de menor eficiencia y finalmente, la numero once (11) por ser la de mayor eficiencia en el primer análisis. Se evidencio que a medida que aumenta la pendiente longitudinal, el flujo captado por los sumideros es menor. Esto también depende de factores como la forma y ubicación de los barrotes, porque los barrotes en sentido paralelo al flujo con separación considerable captarían más flujo a mayores pendientes, pero estarían propensos a colmatarse de desechos de menores tamaños. Si se disminuye el espacio entre barrotes disminuirá el perímetro útil limitando la captación.

En la figura 7 se aprecia que la rejilla once (11) disminuye su eficiencia directamente proporcional al aumento de pendiente. A diferencia de las rejillas uno (1) y cuatro (4), que demuestran una estabilización en la eficiencia al aumentarse la pendiente. A pesar de esto la rejilla número once (11) sigue manteniendo su posición como la más eficiente; cabe aclarar que estos supuestos se hacen asumiendo que las rejillas y cunetas no cuentan con ningún tipo de obstáculo como material articulado o basura que las obstruya en el momento de análisis.

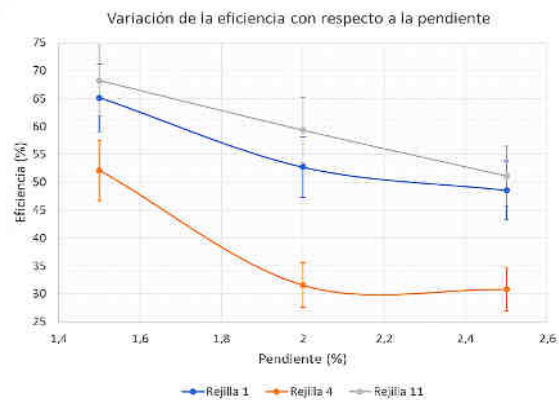


Figura 7. Variación de la eficiencia de 3 tipos de rejilla respecto a la pendiente
Fuente: Los autores

4. Conclusiones

Coincidiendo con las investigaciones de Contreras Cortez & Kriguer Kaliski [10] y Guayambuco Quintero & Collazos Díaz [11], en los análisis de datos se identificó que la eficiencia es inversamente proporcional a la pendiente, entre menor sea la pendiente mayor será el caudal interceptado por las rejillas. También se observó que ante unas condiciones promedio de calzada y escenarios de cambio de pendiente, la rejilla con geometría más eficiente para las vías del barrio Santa Inés es la catalogada con el número once (11), pues esta, a pesar de presentar orificios más largos y barrotes angostos perpendiculares al flujo, su relación de aspecto es ideal pues ayuda a que su espacio sobre la vía sea más compacto.

Comparando los resultados de cada una de las rejillas, uno de los cambios a favor de la eficiencia del sistema de alcantarillado de la zona de estudio, sería el cambio de las rejillas tipo cuatro (4) por rejillas de tipo

uno (1) o tres (3), ya que estas son las que presentan mayor compatibilidad en cuanto a su forma y área de captación, estas tienen aproximadamente el mismo ancho de 40 cm y su longitud se podría adaptar, esto significarían un aumento del 10% de la eficiencia de captación.

En distintos países como Chile la práctica de este tipo de modelamiento ya se hace de manera técnica, su Instituto Nacional de Hidráulica cuenta con laboratorios con la capacidad de modelar vías a escala real para verificar el uso y eficiencia de los distintos tipos de rejillas que comercializan [12]. Con este método se podría adoptar una nueva tendencia, donde basados en datos de un modelo físico a escala reducida, se logre identificar no solo que tipo de rejilla es más eficiente, sino que tipo de sumidero usar o qué tipo de canal de entrada es más óptimo para la entrada al sistema de alcantarillado, así evitar los problemas de represamiento de aguas lluvias que generan las inundaciones en los barrios en zona de riesgo de la ciudad de Tunja.

5. Referencias

- [1] Velásquez-Henao, J. D. and Branch-Bedoya, J. W. Examples in the classroom: pattern classification using the R language, DYNA, 79 (173), pp. 81-88, 2012.
- [2] Velásquez-Henao, J. D., Rueda-Mejía, V. M. and Franco-Cardona, J. D. Electricity demand forecasting using a SARIMA- multiplicative single neuron hybrid model, DYNA, 80 (180), pp. 4-8, 2013.
- [3] M. G. Cárdenas Quintero, “Análisis del drenaje superficial en vías urbanas a partir de un modelo hidrodinámico bidimensional,” 2017.
- [4] M. Cortés Zambrano, W. Amaya Tequia, and D. Gamba Fernández, “IMPLEMENTATION OF THE HYDRAULIC MODELLING OF URBAN DRAINAGE IN THE NOTHEAST SECTOR, TUNJA, BOYACÁ,” Fac. Ing. Univ. Antioquia, pp. 1-19, 2020, [Online]. Available: <https://doi.org/10.17533/udea.redin.20200798>.



- [5] I. A. Núñez Acostas and E. J. Sánchez Tenesaca, “Modelación Hidráulica para la determinación de la eficiencia de los sumideros de aguas lluvias,” Univ. TÉCNICA AMBATO, 2018.
- [6] E. Kaliski Kriguer and R. Cortez Contreras, “Estudio Experimental del funcionamiento de sumideros de aguas lluvia. Caso: Incorporación de zonas de influencia,” Congr. Latinoamericano Hidráulica, Cart. Indias, Colomb., vol. XXIII, 2008.
- [7] R. V. Morales Rodríguez, “Análisis de estudios experimentales realizados por el Instituto Nacional de Hidráulica, Chile, sobre sumideros de aguas lluvias,” Univ. Chile, 2016.
- [8] B. D. Morocho Avemaña, “Modelación numérica para determinación de la eficiencia de los sumideros de aguas lluvias tipo T45, modificado con barrotes circulares aplicando mecánica de fluidos computacionales,” Univ. Técnica Ambato, 2019.
- [9] X. V. Navarro, “Eficiencia de captación de rejillas y sumideros mediante coeficientes de desagüe como orificio. Barcelona,” 2019.
- [10] F. Pazmiño Gavilánez, R. Hechavarría Díaz, F. R. Morales Fiallo, and J. León Mantilla, “Cálculo experimental de la eficiencia hidráulica en sumideros de aguas pluviales,” Ing. Hidraul. y Ambient., vol. XXXVIII, no. 3, pp. 17–29, 2017.
- [11] A. A. Sánchez Herrera, “Procedimiento General de diseño Hidráulico de tragantes para alcantarillado pluvial,” Univ. San Carlos Guatemala, pp. 1–75, 2017.
- [12] R. Cortez, C. Enrique, and K. Kriguer, “ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL FUNCIONAMIENTO DE SUMIDEROS DE AGUAS LLUVIAS CASO : SUMIDERO UBICADO FUERA DE LA CALLE (VEREDA),” 2006.
- [13] V. Guayambuco Quintero and L. Collazos Díaz, “Comparación de diseños de sumidero según normas establecidas por la empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá,” Univ. Mil. Nueva Granada, pp. 76–99, 2010, doi: 10.1558/jsrnc.v4il.24.
- [14] E. Kaliski and R. Cortez, “ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL FUNCIONAMIENTO CASO : INCORPORACIÓN DE ZONAS DE INFLUENCIA,” XXIII Congr. Latinoam. HIDRÁULICA Cart. INDIAS Colomb., p. 13, 2008.
- [15] G. Sotelo Ávila, hidráulica general vol 1 - Fundamentos, Volumen 1. México D. F.: EDITORIAL LIMUSA S.A., 1997.

4

Uso del recurso hídrico en construcción de carreteras y sus impactos ambientales

Héctor Mauricio Sánchez Abril ^a

^aFacultad de ingeniería, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Tunja, Colombia. *hector.sanchez@uptc.edu.co*

Recibido: Fecha, día, 2020. Artículo revisado: Fecha, día, 2020. Aceptado: Fecha, día, 2020.

Abstract

Paper is the product of a review of 9 different road construction projects in Colombia executed in the last 15 years, which were analyzed on the main sources of water used in the process to build the granular layers of their pavements, the challenges faced to obtain this water resource, including regulatory, social and licensing issues and the environmental impacts resulting from this process. From there, some especially important reflections and recommendations were generated from the perspective of the use and management of water resources, to be considered in the construction processes of the roads.

Keywords: Road construction, water resources, efficiency, environmental impacts

Resumen

Este artículo es producto de una revisión a 9 proyectos constructivos viales diferentes en Colombia ejecutados en los últimos 15 años, a los cuales se les hizo un análisis sobre las principales fuentes de agua usadas en el proceso para construir las capas de granulares de sus pavimentos, los retos que se afrontaron para conseguir dicho recurso hídrico incluyendo los normativos, sociales y de licenciamiento y los impactos ambientales producto de ese proceso. A partir de allí se generaron algunas reflexiones y recomendaciones muy importantes desde la perspectiva del uso y manejo del recurso hídrico, a ser tenidas en cuenta en los procesos constructivos de las carreteras.

Palabras clave: Construcción vial, recurso hídrico, eficiencia, impactos ambientales



1. Introducción

Se hizo la revisión a 9 proyectos viales y a partir de allí se establecieron los retos que se presentan en la consecución uso del recurso hídrico para los procesos constructivos viales. Dichos proyectos viales revisados fueron, entre otros: “mejoramiento y mantenimiento de la vía código 45A04 sector Zipaquirá-Ubaté del PR 28+0200 al PR 67+1134, sector vía paso nacional por Cajicá PR11+0700 al PR 16+0100 y sector vía paso nacional por Zipaquirá del PR 25+0200 al PR 28+0200, departamento de Cundinamarca”, “Reconstrucción, pavimentación y/o repavimentación de las vías del programa de infraestructura y desarrollo regional Plan 2500: Grupo A Puerto López - Puerto Gaitán (K49+000 a K73+000)”, “Mejoramiento de vías del municipio de Ubaque ejecutado en el marco de la emergencia ambiental - Colombia Humanitaria”, “mantenimiento del carretera Hobo Letrán ruta 45 departamento del Huila”, “construcción de un retorno en el proyecto vial Bogotá – La Vega – Villeta a la altura del K59+900” y “obras de base estabilizadas con cemento + aditivo químico en el Municipio de Cajicá”.

Se deja claramente establecido, además, que los principales impactos ambientales identificados corresponden en su mayoría a los

que en la literatura algunos autores mencionan, que son principalmente los cambios en cauces, alteraciones a patrones de drenajes naturales y la diferencia de elevación de las aguas subterráneas entre otros, así como la contaminación por derrames de combustibles (Hernández, José. 2001).

Es necesario mencionar que los requisitos del agua que deben cumplirse para que su uso sea permitido son el PH según los parámetros establecidos en las especificaciones de construcción de carreteras (Prueba según la norma de ensayo ASTM D 1293) y contenido de sulfatos (Prueba según la norma de ensayo ASTM D 516), evitando reacciones químicas que alteren las propiedades físicas de los materiales viales. Dichos valores se plasman con detalle en este artículo. Al final se presentan las conclusiones principales que se obtuvieron.

2. Retos en el uso del recurso hídrico

2.1 Proyectos revisados

La revisión de los aspectos principales a nivel ambiental del uso del recurso hídrico así como los retos que se afrontaron en los procesos de construcción vial se realizó sobre los proyectos mostrados en la Tabla 1.

Tabla 1. .Proyectos vials revisados

PROYECTO VIAL
Mejoramiento y mantenimiento de la vía código 45A04 sector Zipaquirá-Ubaté del PR 28+0200 al PR 67+1134, sector vía paso nacional por Cajicá PR11+0700 al PR 16+0100 y sector vía paso nacional por Zipaquirá del PR 25+0200 al PR 28+0200, departamento de Cundinamarca
Reconstrucción, pavimentación y/o repavimentación de las vías del programa de infraestructura y desarrollo regional Plan 2500: Grupo A Puerto López - Puerto Gaitán (K49+000 a K73+000)
Mejoramiento de vías del municipio de Ubaque ejecutado en el marco de la emergencia ambiental - Colombia Humanitaria
Mantenimiento de la carretera Hobo Letrán ruta 45 departamento del Huila
Construcción de un retorno en el proyecto vial Bogotá – La Vega – Villeta a la altura del K59+900

Obras de base estabilizadas con cemento + aditivo químico en el Municipio de Cajicá
 Mejoramiento y construcción de vía terciaria en Antioquia, sector Abriaquí-Frontino
 Estudios y diseños de la conexión puente Arimena – Puerto Carreño, departamentos de Vichada y Meta
 Placa huella en vías terciarias de Villa de Leyva – Boyacá (Año 2016)

Fuente: Autor

2.2 Importancia de la eficiencia del uso del recurso hídrico en obras viales

El crecimiento del número de proyectos de construcción vial aunado a la escasez de recursos naturales se constituye principalmente en la razón para profundizar en esta temática. Se dice que vivimos la época de mayor crecimiento de la infraestructura en la historia humana y que además a mediados del siglo XXI habrán 25 millones de kilómetros de carreteras nuevas pavimentadas a nivel mundial. Esa longitud permitiría rodear la tierra 600 veces o más. De esos kilómetros, 22,5 millones estarían contruidos en países en desarrollo, que poseen ecosistemas de alta importancia para el planeta y su sostenibilidad. [1]

Para poder justificar el cuidado del recurso hídrico además de la importancia que este tiene para los ecosistemas y la misma supervivencia humana, es importante realizar un análisis sencillo del uso que este tiene en los procesos de construcción de carreteras. Este análisis mostrado en la Tabla 2 permite evidenciar que para los diversos procesos constructivos el agua no solo es necesaria sino su calidad debe ser supervisada y las cantidades son altas. En dicha tabla solo se muestra un proceso constructivo de tantos, lo que permite concluir que resulta fundamental tener en cuenta las cantidades necesarias para otros procesos tales como la fabricación de mezclas de concreto hidráulico para alcantarillas, cunetas, bordillos, andenes, otras obras de drenaje y obras complementarias. Además de ello, se hace necesario identificar el agua requerida para paliativos.

Tabla 2. Ejemplo del uso de agua en un proceso de construcción vial

DESCRIPCIÓN DEL PROCESO	JUSTIFICACIÓN DEL REQUERIMIENTO DE AGUA	VOLÚMEN DE AGUA REQUERIDO
Base estabilizada con cemento y aditivo y una humedad óptima del 9.5% con un 4.5% de cemento alrededor de 90 kg / m ³ Longitud del tramo a intervenir/día: 110 m Duración estimada: 30 días (Longitud total del tramo: 3,3 Km) Ancho de la vía: 7 m Espesor de la capa: 0,25 m (25 cm) Según condiciones climáticas se calcula el agua por encima de la humedad óptima un 1 a 2% y por el mezclado por estabilizadora	Para el proceso de humectación previo a la compactación requiere 70-80 lt por m ³ de base estabilizada compactada	POR DÍA = 192,5 * 80 litros = 15400 litros PARA LOS 30 DÍAS = 462000 litros Se estima un total de 500.000 litros de agua los requeridos para construir 1 kilómetro (ancho de 7 m) de pavimento flexible Con capas de 25 cm de subbase, 40 cm de afirmado y 25 cm de base estabilizada.

Fuente: Autor



2.3 Fuentes del recurso hídrico para la construcción de carreteras

Se puede decir que las fuentes principales de recurso hídrico para la construcción de carreteras son la lluvia, las aguas subterráneas, los ríos, los lagos y otras fuentes naturales y el hielo [2].

En la figura 1 se muestran los tipos de pozos que pueden existir para obtención de agua subterránea. Estos podrían ser producto de cavado, hincado o perforación.

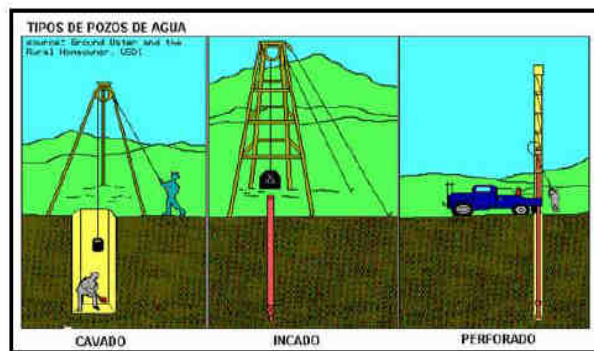


Figura 1. Tipos de pozos para obtener agua subterránea
Source: [2]

2.4 Características del agua para su uso en carreteras

El uso del agua se da en diferentes actividades dentro del proceso constructivo de una carretera. En el caso de la humectación de capas granulares con el fin de que estas sean compactadas, deberá estar libre de cualquier contaminante que afecte el comportamiento del material en servicio o el medio ambiente. Puede ser agua potable; si no lo es, deberá cumplir los requisitos que se indican en la tabla 3.

En el caso del agua para la construcción de sub-base y base estabilizada con una mezcla

asfáltica natural también se deberá cumplir con los requisitos mostrados en la Tabla 3. Estos mismos requisitos se establecen para el caso del uso en mezclas de concreto hidráulico. La única actividad dentro del proceso constructivo vial que no requiere el cumplimiento de estos aspectos corresponde a los paliativos, es decir, al agua usada para disminuir el impacto de los materiales particulados sobre las zonas aledañas a los proyectos viales.

Tabla 3. Requisitos del agua para su uso en construcción vial

CARACTERÍSTICA	NORMA DE ENSAYO ASTM	REQUISITO
PH	D 1293	5.5 – 8.0
Contenido de sulfatos expresado como SO_4 , g/l máximo	D 516	1.0

Fuente: [3]

2.5 Retos en la obtención del recurso hídrico para la construcción de carreteras

Luego del análisis realizado a los nueve (9) proyectos mencionados anteriormente y de dialogar con algunos de los ingenieros que estuvieron participando de estos proyectos en su proceso de ejecución se pudieron definir los siguientes retos o dificultades en la consecución del recurso hídrico o acceso al aprovisionamiento del agua para los procesos constructivos:

- Falta de permisos ambientales de las corporaciones autónomas regionales o la Agencia Nacional de Licencias Ambientales (ANLA).
- No contar con una fuente de abastecimiento natural o fuente hídrica cercana. Esto incrementa los costos para el proyecto.

- No contar con abastecimiento por parte de una empresa de servicios públicos, debido principalmente a la prioridad del recurso para el consumo humano. Esto también genera un aumento en los costos para el proyecto vial.
- Falta de tecnología (bombas y equipos de transporte adecuados).

2.6 Principales impactos ambientales sobre el recurso hídrico en la construcción de carreteras

Los proyectos viales al igual que cualquier obra civil generan impactos sobre el medio ambiente. Son un detonante de bastante peso en la problemática ambiental que existe en Colombia, pues ella que en muchos de estos proyectos existieron inconsistencias que se reflejaron en un inadecuado manejo al uso de los recursos naturales. [4]

Dentro de los principales impactos ambientales de la construcción de carreteras encontramos principalmente los desvíos de cauces, la modificación de patrones naturales de drenajes, la alteración de elevación de las aguas subterráneas, la sedimentación y la erosión en lagos y ríos, la pérdida de sección hidráulica y la contaminación por derrames de combustibles [5].

En el año 2011, el Instituto Nacional de vías (INVIAS) de Colombia publicó la Guía ambiental de proyectos viales denominada “Guía de Manejo Ambiental de Proyectos de Infraestructura Subsector Vial”.

En esta guía el INVIAS estableció los principales impactos ocasionados por los procesos constructivos de carreteras. Dichos impactos se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4. Impactos ambientales más comunes en la construcción de carreteras

TIPO DE AGUA	IMPACTO AMBIENTAL
AGUA SUPERFICIAL	Alteración en la calidad del agua
	Cambio en la capacidad de transporte del agua
	Modificación del cauce
AGUA SUBTERRÁNEA	Cambio del nivel freático
	Modificación de la capacidad de los acuíferos
	Alteración en la calidad del agua de los acuíferos
	Cambios de zonas de recarga hídrica

Fuente: [6]

Luego de la revisión hecha a los nueve (9) proyectos viales relacionados en este artículo se pudieron consolidar los principales impactos ambientales que se generaron por las diferentes actividades tales como la humectación de las capas granulares para la compactación como se muestra en la figura 2. Estos impactos ambientales se muestran en la Tabla 5.



Figura 2. Humectación de capas granulares
Source: Autor



Tabla 5. Impactos ambientales evidenciados en los proyectos viales revisados

TIPO DE AGUA	IMPACTO AMBIENTAL
AGUA SUPERFICIAL	Modificaciones en el agua y su calidad (derrame de combustibles y vertimientos de desechos de construcción) Alteración en la capacidad de transporte del agua por sedimentos Cambios temporales del cauce
AGUA SUBTERRÁNEA	Cambios en el nivel freático Modificación de la capacidad de los acuíferos Modificación en la calidad del agua de los acuíferos

Fuente: Autor

Cada uno de los impactos ambientales antes de la ejecución de los procesos constructivos viales quedan registrados en matrices de riesgos ambientales y en los planes de manejo ambiental requeridos, sin embargo, se ha podido observar que muchos de los impactos generados por el uso del recurso hídrico se escapan de la previsión realizada por los constructores [7]

3. Resultados y análisis

Desde el análisis se observó que, en definitiva, uno de los procesos que más genera impactos ambientales sobre el componente abiótico (recursos naturales) es la construcción vial, aunado a los generados sobre el componente biótico (flora y fauna) que corresponde a los ecosistemas y a las comunidades [8].

Se pudo concluir entre tantos aspectos que la búsqueda de recurso hídrico en los proyectos viales en Colombia en aras de cumplir

las especificaciones generales de carreteras y los compromisos contractuales de los contratistas con las entidades contratantes se realiza tanto en fuentes superficiales como subterráneas, generando diversos impactos ambientales entre los que se destacan el desvío de cauces y la modificación de patrones naturales de drenaje.

Así mismo, se concluyó que los retos principales tienen que ver con los aspectos normativos y de licenciamiento entre otros.

Se pudo evidenciar que la previsión de varios de los impactos ambientales sobre el recurso hídrico no se tuvo, no quedando registrados en las matrices de riesgos ambientales previos al proyecto. Esto se observó en estos proyectos, pero también algunos sostienen que una de las falencias en la ejecución de construcción de vías de primer orden, incluyendo las concesiones, obedecen a esa falta de previsión de impactos ambientales. [7]

Fue notoria la dificultad presentada en los distintos proyectos viales analizados, respecto a la consecución del recurso hídrico para la ejecución de los procesos constructivos.

Se hace necesario que se optimice del uso del recurso hídrico en los proyectos viales ya que siguen existiendo poblaciones que aún no tienen acceso al agua potable y una externalidad adicional de los proyectos de infraestructura para el transporte, como lo son las carreteras, podría ser la privación del recurso hídrico para dichas poblaciones a causa de una mala gestión en su consecución y manejo.

4. Referencias

- [1] Sánchez, J. análisis de la importancia e influencia de la gestión ambiental en el desarrollo de proyectos de infraestructura vial urbana tipo b: (rehabilitación y/o mantenimiento de vías vehiculares menores), Monografía, Ingeniería Ambiental, Universidad Nacional Abierta y a Distancia, Bogotá, Colombia, 2016
- [2] Martin, M. Análisis del uso del agua en la obra vial. Trabajo en construcción vial. Universidad Santo Tomás, 2020
- [3] INVIAS. Especificaciones generales de carreteras, Bogotá, Colombia, 2013.
- [4] Zapata, M. Problemáticas ambientales generadas por la construcción de proyectos de infraestructura vial en Colombia, Monografía Especialización en Planeación Ambiental y Manejo Integral de los recursos naturales, Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá, Colombia, 2017
- [5] Hernández J. Impacto ambiental de proyectos carreteros, Efectos por la construcción y conservación de superficies de rodamiento: II pavimentos rígidos, 2001
- [6] INVIAS. *Guía de Manejo Ambiental de Proyectos de Infraestructura Subsector Vial*, Bogotá, Colombia, 2011.
- [7] Mosquera, W. E. Análisis de la gestión ambiental en las vías 4G en construcción en Colombia, Revista Ontare, 4 (1) p.p 31-66, 2016 <https://doi.org/10.21158/23823399.v4.n1.2016.1515>
- [8] Enshassi, A, Kochendoerfer, B, & Rizq, E. Evaluación de los impactos medioambientales de los proyectos de construcción. *Revista ingeniería de construcción*, 29(3), 234-254. 2014 <https://dx.doi.org/10.4067/So718-50732014000300002>

SWMM Software Applicationn for Water Quality Modeling in Urban Areas. Case Study: Santa Ines District - Tunja.

Mónica Yineth Lara Pérez ^a & Melquisedec, Cortés-Zambrano ^b

^a Facultad de ingeniería civil, Universidad Santo Tomás, Villavicencio, Colombia.
monicalara@usantotomas.edu.co

^b Facultad de ingeniería civil, Universidad Santo Tomás, Tunja, Colombia.
melquisedec.cortes@usantoto.edu.co

Recibido: Fecha, día, 2020. Artículo revisado: Fecha, día, 2020. Aceptado: Fecha, día, 2020.

Abstract

Wastewater is any water, which has been used and mix with solids, that is introduced into the sewer and transported through the sewage system [1]. Usually places that have a water supply system, require an evacuation procedure, what is known as a sewer system. These are a set of structures designed to receive, evacuate, convey and dispose wastewater; as a result of human activities, or those that come as a result of rainfall. According to their origin are distinguished between sanitary, rainfall and combined [2]. In this investigation a water analysis will be carried out by measuring the concentration of pollutants that is delivered to the collectors of the northern area of Tunja, performing the modeling in the SWMM program, and thus analyze the behavior that has the backbone of the sewer system in this area.

Keywords: Sewerage, Water Quality, Modeling, SWMM

Resumen

Las aguas residuales son aguas que luego de su disposicion contienen solidos que por un medio u otro se introducen en las cloacas y se transportan mediante el sistema de alcantarillado [1]. Normalmente los lugares en donde se lleva a cabo un sistema de suministro de agua, requieren una medida de evacuación, lo que se conoce como sistema de alcantarillado, siendo un conjunto de estructuras destinadas a recibir, evacuar, conducir y disponer las aguas servidas; provenientes de las actividades humanas, o de la precipitación pluvial y de acuerdo a su procedencia se distinguen en sanitario, pluvial y combinado [2]. En la presente investigación se llevo a cabo un análisis del agua midiendo la concentración de algunos contaminantes que son entregados a los colectores de la zona norte de Tunja, realizando la modelación en el programa SWMM, para así analizar el comportamiento de la red troncal del alcantarillado de esta zona.

Palabras clave: Alcantarillado, Calidad de Agua, Modelación, SWMM.

1. Introducción

El objetivo principal de la investigación es diseñar un modelo hidrodinámico de calidad de drenaje urbano del sector nororiental de Tunja en el barrio Santa Inés, Tunja. Esto debido a que actualmente la ciudad de Tunja, ha presentado un fenómeno de ocupación o alteración de cauces naturales de aguas lluvia o de escorrentía que conducen dichos flujos a los cuerpos receptores causando una repercusión en el drenaje al no respetarse la hidrología de las cuencas naturales afectando la capacidad de drenaje de las mismas. Además de esto presenta un considerable y acelerado desarrollo urbano en la parte nororiental, generando una preocupación debido a esto y a los continuos cambios de las superficies de drenaje que permiten la infiltración por zonas duras e impermeables, causando reboses e inundaciones, afectando a la ciudadanía y en una ciudad en proceso de crecimiento y transición de sus redes de acueducto y alcantarillado, se hace necesario conocer el comportamiento operativo del sistema. Conocer el funcionamiento hidráulico de las redes en tiempo real es un instrumento de vital importancia para identificar áreas de conflicto, vulnerabilidades y riesgos; además, con ello es posible plantear medidas de prevención, dictar alternativas de solución, optimizar el funcionamiento del sistema de drenaje urbano, prevenir daños y problemas en las estructuras, priorizar recursos, cumplir metas contractuales y mejorar la calidad de vida de los ciudadanos [3].

La contaminación que se asocia a las escorrentía urbana es una gestión que cada día presente mas dificultad debido a la natura-

leza estocástica de las lluvias y los regímenes hidrológicos particulares de algunos ríos [4]. Los cauces naturales en donde se generan mayores vertidos son aquellos en donde las diferencias estacionales en sus caudales son significativas, ya que el caudal de agua que es aportado por los aliviaderos en ocasiones supera el caudal circulante. Hoy en día para la gestión integrada de drenaje urbano es importante evaluar la calidad del agua pluvial. Las características de un agua residual pueden hacerse de distintas maneras dependiendo del propósito específico, para esto se requiere caracterizar estas aguas por medio de un muestreo analizando los parámetros que se deseen estudiar [1].

SWMM (Storm Water Managment Model), es un modelo de simulación que permite predecir la evolución de los parámetros relacionados con la calidad del agua en un periodo de lluvia, en donde se considera la acumulación y lavado de los contaminantes que quedan en la superficie de la cuenca de aporte, sin tener en cuenta la sedimentación de partículas en la conducción [5]. En cambio, los modelos desarrollados por HydroWorks (Infoworks) y Mouse Trap (Mike Urban), requieren la definición real de numerosos parámetros de calidad para una obtención de resultados confiables. La falta de información de campo, hace que se termine utilizando valores que se presentan por defecto, sin un conocimiento adecuado de su influencia. La incertidumbre por lo tanto dificulta el uso de estos programas [6]. Para esto se plantea caracterizar las aguas residuales tanto en periodo seco como en periodo de lluvia y así analizar el comportamiento de las características de estas aguas para evaluar el cumplimiento de la normatividad de vertimientos vigente en Colombia.



2. Metodología

2.1 Base Topologica Red de Drenaje Distrito Santa Inés.

Una vez realizadas las actividades de inspección, catastro de redes, verificación de conectividad del sistema, identificación de pozos iniciales, se procedió a ejecutar la delimitación del distrito Santa Inés [7].

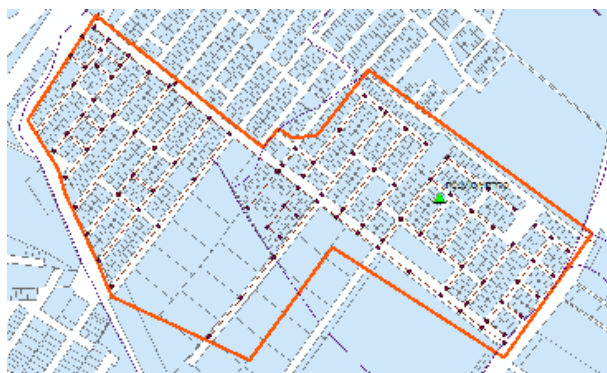


Figura 1. Tomado de [7]

Se lleva a cabo la selección de puntos teniendo en cuenta la ubicación de la red ya que el primer punto (PATP 3955) se encuentra en la parte inicial de la red tomando la distribución de la zona oriental, el segundo punto (PATP 3910) toma la zona occidental y finalmente el punto final (PATP 4091) toma el recorrido total finalizando la red.

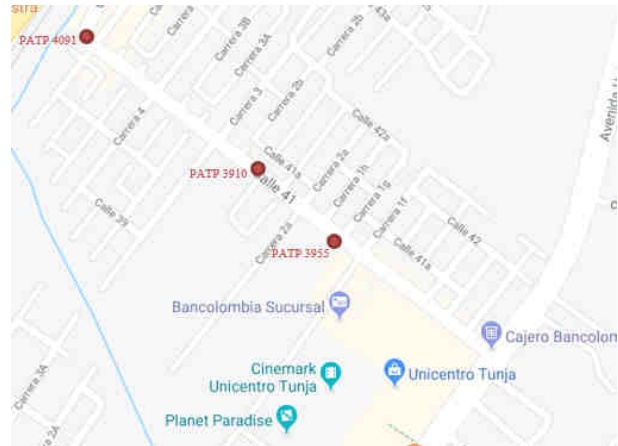


Figura 2. Elección Puntos Toma de Muestras
Fuente: Autores

Las figuras [3-5] muestran estos puntos que escogimos para el respectivo análisis ya en campo.



Figura 3. Punto #1. PATP 3955
Fuente: Autores



Figura 4. Punto #2. PATP 3910
Fuente: Autores

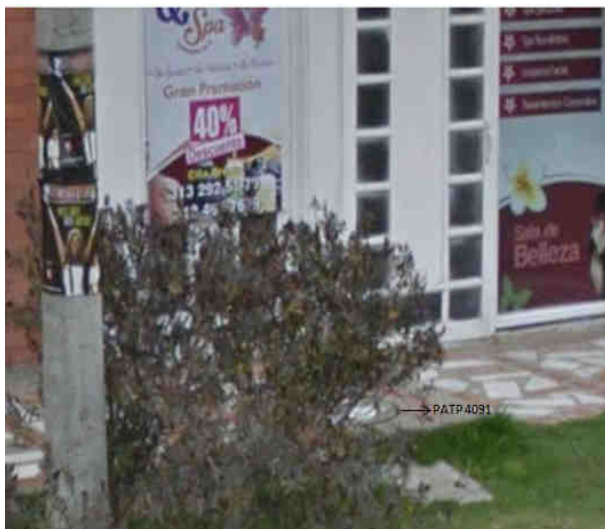


Figura 5. Punto #3. PATP 4091
Fuente: Autores

Realizando un muestreo compuesto durante 24 horas para así analizar los siguientes contaminantes:

- **Cloruros:** El ion (cloruro) es altamente corrosivo y da lugar a deterioros y picaduras en tuberías y sistemas de distribución de aguas, así mismo, y en función de su contenido de pH del agua y otros iones

presentes en ella, puede degradar los hormigones [8].

- **DBO:** La Demanda Bioquímica de Oxígeno mide la cantidad de oxígeno que los microorganismos consumen durante la degradación de las sustancias orgánicas contenidas en la muestra. En esta se detecta el material orgánico degradado biológicamente o que es biodegradable, midiendo el grado de contaminación. Siendo un proceso biológico que requiere tiempo y se realiza a 20°C durante 5 días [9].
- **DQO:** La Demanda Química de Oxígeno es la cantidad de oxígeno necesaria para oxidar toda la materia orgánica por medios químicos y convertirla en CO₂ y H₂. Busca la oxidación completa de la muestra, de manera que todo el material orgánico es químicamente oxidado. Cuanto mayor es la DQO, más contaminada está el agua y su prueba toma alrededor de 3 horas [9].
- **Oxígeno Disuelto:** El agua residual frecuentemente contiene material orgánico que es descompuesto por microorganismos, que utilizan el oxígeno en los procesos. (La cantidad de oxígeno consumida por estos organismos en el rompimiento de los residuos se conoce como demanda bioquímica de oxígeno o DBO. Se establece como la concentración actual (mg/L) o como la cantidad de oxígeno que puede tener el agua a una temperatura determinada. Se conoce también como el porcentaje de saturación y dado que evita la formación de olores desagradables en las aguas residuales, es deseable y conveniente disponer de cantidades suficientes de oxígeno [10].
- **pH:** La actividad biológica se desarrolla dentro de un intervalo de 5 a 9, un pH



menor a este se conoce como un agua ácida y da lugar a la solubilización de sustancias por ataque a los materiales. Además de esto es más fácil tratar por métodos biológicos aguas con un pH entre 6,5. A 8,5 [11]

- **Sólidos Suspendidos:** En el agua que se encuentra en la naturaleza se pueden encontrar varias impurezas de forma suspendida o disuelta. En la cuantificación de los niveles de impurezas, el término sólido en suspensión describe las partículas en suspensión presentes en una muestra de agua. Prácticamente, estas partículas se definen por su imposibilidad de ser separadas de la muestra de aguas usando un filtro. Las partículas más pequeñas, incluyendo especies conteniendo cargas iónicas, se refieren como sólidos disueltos [12].
- **Sulfatos:** El origen de los sulfatos se debe fundamentalmente a los procesos de disolución de las tizas, existentes en el terreno, en el agua subterránea. El sulfato es uno de los principales constituyentes disueltos de la lluvia ya que al moverse el agua a través de formaciones rocosas y suelos que contienen minerales sulfatados, una parte del sulfato se disuelve en las aguas subterráneas [13].
- **Sulfuros:** Su presencia en aguas residuales proviene en gran parte de la descomposición de la materia orgánica, algunas veces de desechos industriales. La mayoría proviene de la reducción bacteriana del sulfato. El sulfuro de hidrógeno que pasa al aire desde las aguas residuales que lo contienen, causa problemas de malos olores [11].

2.2 Sulfuro de Hidrógeno

El propósito del estudio de la acumulación de sulfuro en una alcantarilla existente es predecir las condiciones en una nueva alcantarilla. El Manual de la EPA de 1974 proporciona ecuaciones para el análisis cualitativo de la capacidad de generación de sulfuros. El objetivo de estas ecuaciones es el desarrollo de un modelo general para la acumulación de sulfuros.

En 1950, Davy presentó una fórmula más completa que relacionaba el número de Reynolds, efectividad de DBO_5 , el área de la sección transversal del flujo y el ancho de la superficie. Este trabajo fue posteriormente modificado por Pomeroy para desarrollar lo que se conoce como la fórmula Z [14]:

$$Z = \frac{eDBO}{S^{0.50}Q^{0.33}} \times \frac{P}{b} \quad (1)$$

El valor de Z obtenido se interpreta de la siguiente manera:

Tabla 1. Interpretación Valores de Z

Valor de Z	Condición de Sulfuro
$Z < 5.000$	El sulfuro raramente se produce
$5.000 \leq Z \leq 10.000$	Condición secundaria para la acumulación de sulfuro
$Z > 10.000$	La acumulación de sulfuro es común

Fuente: [14]

3. Resultados y análisis

3.1 Caracterización de las Muestras

Luego del muestreo realizado se suministraron las muestras al laboratorio para el respectivo análisis teniendo los resultados presentados en las tablas [2-4].

Tabla 2. Resultados Parámetros en Laboratorio del Punto 3955.

Análisis Realizado	Resultado Periodo Seco	Resultado Periodo de Lluvia
DBO-5 (mg/L)	315,6	96
DQO (mg/L)	522,16	481
Cloruros (mg/L)	60,69	52,0
pH	6,94	7,96
SST (mg/L)	132,5	86,0
Sulfatos (mg/L)	61,90	68,9
Sulfuros (mg/L)	<4	350

Fuente: Autores

Tabla 3. Resultados Parámetros en Laboratorio del Punto 3910.

Análisis Realizado	Resultados Periodo Seco	Resultados Periodo de Lluvia
DBO-5 (mg/L)	372,15	267
DQO (mg/L)	541,86	481
Cloruros (mg/L)	53,55	37
pH	6,89	8,10
SST (mg/L)	115	85
Sulfatos (mg/L)	44,90	63,7
Sulfuros (mg/L)	<4	294

Fuente: Autores

Tabla 4. Resultados Parámetros en Laboratorio del Punto 4091.

Análisis Realizado	Resultados Periodo Seco	Resultados Periodo de Lluvia
DBO-5 (mg/L)	365,165	321
DQO (mg/L)	522,16	518
Cloruros (mg/L)	60,69	41
pH	7,04	7,04
SST (mg/L)	117,5	30
Sulfatos (mg/L)	74,05	86,9
Sulfuros (mg/L)	<4	385

Fuente: Autores

Estos valores son introducidos en el modelo, se analiza también que su pH se encuentra dentro del rango en donde está agua puede ser tratada por medio de procesos biológicos, tanto en periodo seco como en periodo de lluvia no hay una variación notable

debido a que el evento de lluvia presentado no tiene una alta intensidad como se muestra en la tabla 5.

Tabla 5. Evento de Lluvia Implementado en el Modelo.

Evento	Lluvia Total (mm)	Duración (min)	Intensidad (mm/h)	Periodo de Retorno
16 Julio	3,75	35	6,43	< 2 años

Fuente: Autores

3.2 Uso de la Tierra.

Se consideraron tres usos de suelo: residencial, pavimento y cobertura vegetal de acuerdo a lo observado en campo, en donde se encuentra que de las 56 cuencas de este estudio, un 78% tienen un porcentaje de permeabilidad mayor al 60%.

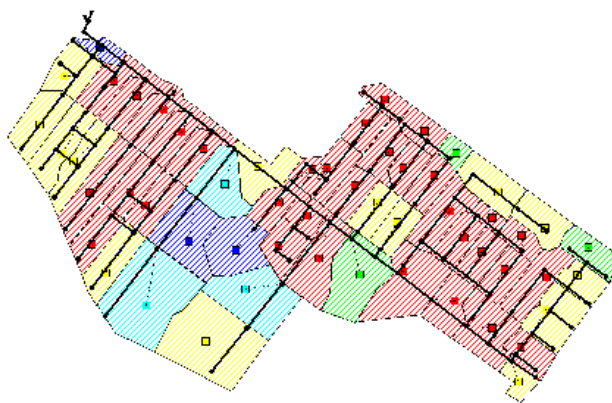


Figura 7. % de Impermeabilidad

Fuente: Autores

Las áreas permeables se conforman principalmente por los prados cubiertos de hierba, superficies que no se encuentran conectadas con el sistema de alcantarillado y presentan un bajo potencial de escorrentía y facilita la infiltración.



3.3 Simulación

La tasa de evaporación depende de factores meteorológicos y de las características de la superficie y es influenciada por el contenido de humedad en la masa de aire cercana a la superficie de evaporación [15], se tomaron los registros de evaporación de la estación climatológica UPTC ya que es la más cercana a la zona de estudio como se presenta en la tabla 6 y dando como resultado la continuidad de la escorrentía simulada en el modelo [16]

Tabla 6. Evaporación Media Total Mensual Multianual de la Estación Climatológica UPTC

Evaporación	Jul	Ago	Sept	Oct
Media/Mensual (mm)	86,8	92,8	100	102
Media/Diaria (mm/d)	2,89	3,09	3,33	3,40
Promedio (mm/d)	3,18			

Fuente: [16]

A continuación, se muestra el comportamiento de los contaminantes evaluados en el nodo cercano a la salida (PATP 4091) cuando se presenta un evento de lluvia, en donde se evidencia que al inicio del evento de lluvia hay una elevación en la concentración de la carga contaminante y cuando este evento finaliza la carga empieza a disminuir a tal punto que es menor que en periodo seco ya que esta primera lluvia lo que realiza es un arrastre de la mayoría de los contaminantes presentes en la cuenca, traduciéndose en que la carga vaya disminuyendo a medida que pasa la creciente.

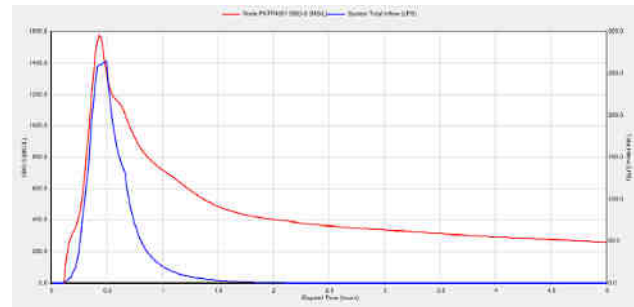


Figura 8. Comportamiento DBO₅ y Caudal Total.
Fuente: Autores

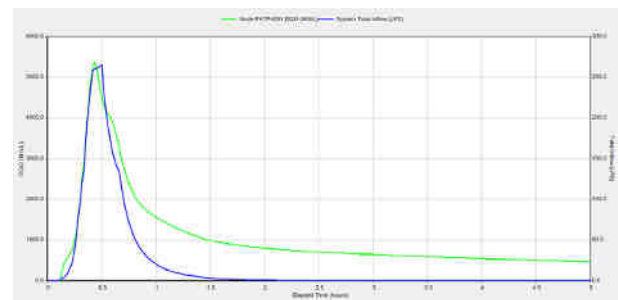


Figura 9. Comportamiento DQO y Caudal Total.
Fuente: Autores

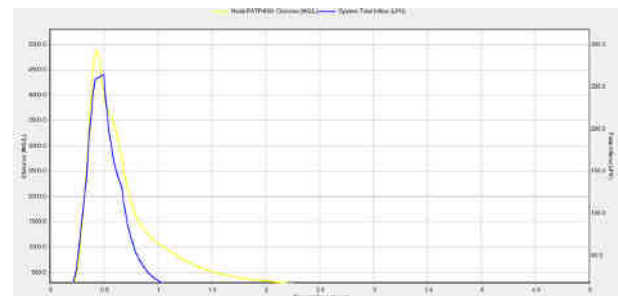


Figura 10. Comportamiento Cloruros y Caudal Total.
Fuente: Autores

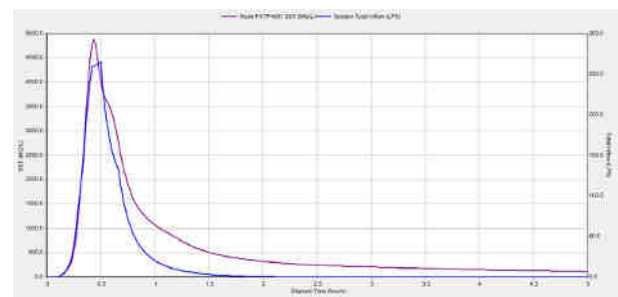


Figura 11. Comportamiento SST y Caudal Total.
Fuente: Autores

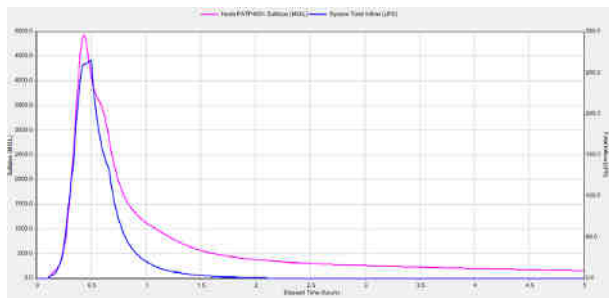


Figura 12. Comportamiento Sulfatos y Caudal Total.
Fuente: Autores

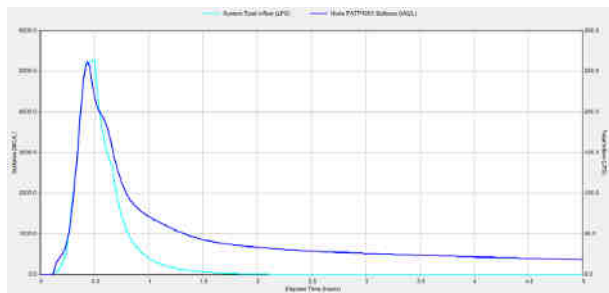


Figura 13. Comportamiento Sulfuros y Caudal Total.
Fuente: Autores

Las figuras [8-13] comparan los resultados simulados entre el caudal y los contaminantes en la salida de la cuenca. Para todos los casos, las concentraciones de contaminantes excedieron el caudal máximo, mostrando relevancia los procesos de acumulación, lavado y transporte generando un remanente del contaminante generando así que el caudal disminuya primero que la carga contaminante.

3.4 Generación de Sulfuro.

La tabla 7 muestra los resultados de generación de sulfuro en todos los tramos en concreto de la zona de estudio en donde el color verde indica que el sulfuro raramente se produce, el amarillo indica una probabilidad de que este se produzca y el rojo evidencia la acumulación de sulfuro de hidrogeno. Estableciendo así que, de las 112

tuberías evaluadas, 52 tienen una alta probabilidad de generación de sulfuro y 3 tienen una condición secundaria de generación de sulfuro como lo indica la interpretación del valor de Z.

Tabla 7. Probabilidad de Producción de Sulfuro de Hidrógeno

Tramo	Z	Tramo	Z
PATLAL4741	286,948	PATLAL4804	0
PATLAL4742	14961,449	PATLAL4805	19181,969
PATLAL4743	19732,557	PATLAL4806	31057,307
PATLAL4744	1959,816	PATLAL4807	0
PATLAL4745	25010,071	PATLAL4809	1379,208
PATLAL4746	19325,388	PATLAL4810	1518,157
PATLAL4747	0	PATLAL4811	10606,031
PATLAL4748	0	PATLAL4994	1627,46
PATLAL4749	55131,607	PATLAL4995	27077,951
PATLAL4750	2428,179	PATLAL4996	2424,133
PATLAL4751	1334,034	PATLAL4997	39640,4
PATLAL4752	15509,457	PATLAL4998	33712,539
PATLAL4754	23519,386	PATLAL4999	0
PATLAL4757	0	PATLAL5000	0
PATLAL4758	0	PATLAL5001	0
PATLAL4759	1898,148	PATLAL7594	9346,264
PATLAL4760	1878,098	PATLAL7595	0
PATLAL4761	20049,83	PATLAL7596	17278,768
PATLAL4762	30969,852	PATLAL7597	0
PATLAL4763	0	PATLAL7598	30387,26
PATLAL4764	320,329	PATLAL7599	27500,09
PATLAL4765	13064,168	PATLAL7600	29416,646
PATLAL4766	2319,844	PATLAL7601	7212,652
PATLAL4768	18467,157	PATLAL7603	0
PATLAL4769	0	PATLAL7604	0
PATLAL4771	25334,14	PATLAL7605	0
PATLAL4772	2816,97	PATLAL7606	0
PATLAL4773	19934,308	PATLAL7607	66811,409
PATLAL4774	0	PATLAL7608	14086,141
PATLAL4775	22679,642	PATLAL7609	18706,94
PATLAL4776	0	PATLAL7610	13436,455
PATLAL4777	0	PATLAL7612	20397,905
PATLAL4778	0	PATLAL7613	13211,05
PATLAL4779	28491,066	PATLAL7615	26256,416
PATLAL4780	14134,925	PATLAL7616	15333,006
PATLAL4781	1452,415	PATLAL7619	15472,388
PATLAL4782	17733,161	PATLAL7620	0
PATLAL4783	29716,49	PATLAL7621	23382,543
PATLAL4784	0	PATLAL7622	31519,325
PATLAL4785	1236,264	PATLAL7623	15548,603
PATLAL4787	13859,458	PATLAL7624	18593,306
PATLAL4788	18495,793	PATLAL7625	4449,585
PATLAL4789	16470,123	PATLAL7626	3718,041



PATLAL4790	1018,695	PATLAL7627	5086,538
PATLAL4791	18608,47	PATLAL7628	23324,631
PATLAL4792	59200,972	PATLAL7629	0
PATLAL4794	40473,978	PATLAL7630	0
PATLAL4795	0	PATLAL7631	0
PATLAL4796	1037,811	PATLAL7632	877,806
PATLAL4797	0	PATLAL7633	16701,222
PATLAL4798	0	PATLAL7634	13416,357
PATLAL4799	0	PATLAL7635	70174,637
PATLAL4800	0	PATLAL7636	2435,488
PATLAL4801	0	PATLAL9265	11200,975
PATLAL4802	0	PATP4812	0
PATLAL4803	0	VERT	0

Fuente: Autores

El sulfuro de hidrógeno se forma a partir de una reacción biológica en sistemas de desagüe, generada a través de una fermentación anaeróbica de materia orgánica presente en aguas residuales. Cuando en el interior de una tubería no hay oxígeno, los microorganismos se alimentan y producen sulfuro de hidrógeno con un característico olor a huevo podrido que puede ser altamente tóxico para los seres humanos. Este es un gas incoloro y nocivo que se genera en las redes de alcantarillado en las que no hay oxígeno teniendo efectos adversos para la salud ya que produce una gran irritación de los ojos y de las membranas mucosas del tracto respiratorio [17].

Las aguas residuales en las tuberías de drenaje contienen altas concentraciones de sales de sulfato ocasionando un proceso de corrosión en las tuberías de hormigón conocido como corrosión influenciada microbiológicamente que se lleva a cabo en cuatro etapas iniciando con la formación del sulfuro de hidrógeno bajo condiciones anaerobias se oxida generando ácido sulfúrico biogénico generando problemas graves de corrosión en sistemas que tienen una concentración igual o superior a 2,0 mg/L en donde uno de los métodos para controlar la producción de azufre es optimizar el diseño hidráulico del

sistema utilizando modelos de predicción para la formación de sulfuro de hidrógeno y para la acumulación de azufre [18].

Este fenómeno tiene un gran impacto económico, ya que en países como Alemania el 40% se gastan mil millones de dólares reparando los daños causados por el ácido sulfúrico biogénico; en Flandes, Bélgica la corrosión representa un costo del 10% del costo total del tratamiento de las aguas residuales y en Estados Unidos se gastan 400 millones de euros en la restauración de los oleoductos afectados por el ácido sulfúrico biogénico. [19]

4. Conclusiones y Recomendaciones

- Se logró realizar una caracterización parcial de la calidad del agua residuales del alcantarillado del Barrio Santa Inés, zona Nororiental de Tunja en periodos seco y periodo de lluvia, observando que los resultados medición de los parámetros indican que hay un aumento considerable de contaminantes en periodo de lluvia a excepción del pH que debido a la poca intensidad del evento de lluvia que tanto en periodo seco como de lluvia siguen dentro del rango establecido para facilidad del tratamiento biológico.
- De acuerdo con la caracterización obtenida de la descarga del sector de alcantarillado y contrastando los resultados obtenidos con los estándares establecidos en la normativa vigente en Colombia para vertimientos, se evidencia que los valores límites máximos permitidos son superados durante el periodo seco y durante el periodo de lluvia se encuentran cercanos al límite establecido, concluyendo así la importancia de realizar un tratamiento al agua residual

previo a un vertimiento y así evitar un alto impacto económico y/o ambiental.

- Aproximadamente un 50% de las tuberías de concreto existentes en la red tienen una probabilidad de generar sul-

furo de hidrógeno por lo que es necesario establecer una solución adecuada para evitar perjuicios de salud a la población de la zona de estudio.

5. Citación

- [1] J. A. Romero Rojas, Tratamiento de Aguas Residuales, Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería, 2004.
- [2] R. Pérez Carmona, Diseño y construcción de alcantarillados sanitario, pluvial y drenaje en carreteras, Bogotá: Ecoe Ediciones, 2013.
- [3] Gerencia de Planeación y Construcciones, «Consolidación Plan Maestro de Drenaje Urbano,» Tunja, 2017.
- [4] M. Obermann, K. Rosenwinkel y M. Torunoud, «Investigation of First Flushes in a Medium - Sized Mediterranean Catchment.,» Journal of Hydrology, 2009.
- [5] J. R. Gironas, L. Rossman y J. Davis, «Storm water Management Model. Applications manual, EPA/600/R-09/077.,» United States Environmental Protection Agency., 2009.
- [6] I. Seco, Contaminantes y contaminación en el agua. Modelación de procesos ambientales., Tunja, 2016.
- [7] E. Amaya, «Modelización Hidráulica de Drenaje Urbano. Aplicación Sector Nororiental Distrito Santa Inés Tunja – Boyacá.,» Universidad Santo Tomas., Tunja, 2019.
- [8] Universidad de Jaen, «Análisis de Aguas,» 2016.
- [9] Microlab Industrial, «Aguas Residuales,» 20 Febrero 2015. [En línea]. Available: <https://www.aguasresiduales.info/revista/blog/analisis-comparativas-y-relaciones-entre-la-dbo-dqo-cot>.
- [10] CIMCOOL, «Reporte Técnico: Oxígeno Disuelto.,» Milacron Mexicana Sales, Queretaro, 2004.
- [11] M. Espigares y J. Pérez, «Composición de Aguas Residuales,» Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico del Agua de la Universidad de Salamanca., Salamanca.



- [12] Withman College, «Solidos Totales,» Washington, 2011.
- [13] Lenntech, «Sulfatos,» Holanda, 2003.
- [14] American Concrete Pipe Association, «Concrete Piper Handbook,» United States of América, 1998.
- [15] S. Fattorelli y P. Fernández, «Diseño Hidrológico,» Water Assessment & Advisory Global Network, Zaragoza, 2011.
- [16] E. Amaya y M. Cortes, «Hydraulic Modeling of Urban Drainage. Implementation in the Northeast Sector, Santa Inés District, Tunja - Boyacá.» Universidad de Antioquia, 2020.
- [17] E. Bas, «Aguas Residuales,» 11 Mayo 2017. [En línea]. Available: <https://www.aguasresiduales.info/expertos/tribuna-opinion/que-es-y-como-combatir-el-sulfuro-de-hidrogeno-h2s-o-gas-de-alcantarilla-9kMea#:~:text=El%20sulfuro%20de%20hidr%C3%B3geno%20es,efectos%20adversos%20para%20la%20salud..>
- [18] M. Cortes y E. Vera, «Durability Considerations for Mitigating Corrosion Caused by Biogenic Sulfuric Acid in Sewerage System,» Journal of Physics: Conference Series, 2019.
- [19] M. Cortes y E. Vera, «Methodology for Simulating the Process of Microbiologically Induced Degradation of Concrete by Chemical Exposure of Specimens under Controlled Laboratory Conditions,» Journal of Physics: Conference Series, 2019.

6

Localización óptima de relleno sanitario aplicando técnicas multicriterio en sistemas de información geográfica (SIG)

Manuel Orlando Hernández Rivera ^a

^a Facultad de ingeniería, Universidad Santo Tomás de, Tunja, Colombia. manuel.hernandez@usantoto.edu.co

Recibido: Fecha, día, 2020. Artículo revisado: Fecha, día, 2020. Aceptado: Fecha, día, 2020.

Abstract

In this thesis, a study was conducted in the city of Tunja, capital of the Boyacá Province, Colombia, in order to determine the optimal location for the final disposal of solid waste, due to the fact that the existing landfill of Pírgua has reached its total capacity. The optimal location was analyzed by means of multi-criteria techniques using GIS (Geographic Information Systems). For locations were identified that meet the technical and formal requirements of the Administrative Order 838/2005, which set the procedure, criteria, methodology, prohibitions and restrictions for the final disposal of solid waste (Mena, Gajardo, J., & Ormazabal, Y., 2010).

Keywords: Solid waste, Landfill, G.I.S., P.O.T., Mapping.

Resumen

En Tunja, capital del departamento de Boyacá, Colombia, se realizó un estudio para determinar la localización de un terreno que reuniera las condiciones técnicas y normativas vigentes, exigidas para la disposición final de residuos sólidos; Teniendo en cuenta que el actual Relleno Sanitario de Pírgua llegó a su capacidad total.

Se estudió la localización óptima mediante técnicas multicriterio en un Sistema de Información Geográfico, estableciendo las características y criterios apropiados para el fin señalado, situando cuatro áreas probables para su instalación y representando los resultados mediante cartografía temática. Como referencia se siguió, el decreto 838 de 2005, procedimiento, criterios, metodología, prohibiciones y restricciones para la localización de áreas para la disposición final de residuos sólidos (Mena, Gajardo, J., & Ormazabal, Y., 2010).

Palabras Clave: Residuos Sólidos; Relleno Sanitario; S.I.G.; P.O.T.; Cartografía.



1. Introducción

Tunja atraviesa una difícil situación, por cuenta del relleno sanitario, que según expertos el mes de abril del 2015 copó su capacidad total. Problemática que se presenta por el incumplimiento de las 60 administraciones municipales que han dispuesto sus residuos sólidos por espacio de 7 años, no han previsto alternativas de solución definitiva a sus casos particulares.

Preguntas de Investigación:

¿Qué sitio de la ciudad de Tunja es óptimo para ubicar un relleno sanitario y que cumpla con la normativa vigente?

¿Qué herramientas de S.I.G. pueden servir de modelo particular para la selección de sitios de disposición final de desechos para el área del municipio de Tunja?

Hipótesis:

Los Sistemas de información Geográfica y Evaluación Multicriterio para la localización de relleno sanitario, genera varios beneficios como; menor impacto ambiental, mejor planificación del POT, creación de un modelo aplicable en otra región, toma de decisiones rápidas y efectivas con parámetros geográficos dinámicos.

Justificación:

Según la Constitución Política Nacional y la normativa vigente respecto al saneamiento básico y protección del medio ambiente, es necesario garantizar un ambiente sano a la población del municipio de Tunja y a sus municipios vecinos. Por lo anterior se requiere alcanzar una solución a la pro-

blemática de disposición final de residuos sólidos necesario e inaplazable para el municipio, aplicando las herramientas de Evaluación Multicriterio y S.I.G.

Modelo Conceptual:

Definido el esquema metodológico de la herramienta, el cual representa la metodología a través de un flujograma operacional o esquema metodológico que muestra las secuencias operacionales que se aplicarán sobre las entidades iniciales del SIG, hasta llegar a niveles o capas temáticas concluyentes.



Figura 1. Esquema Metodológico del trabajo de Investigación.

2. Revisión Bibliográfica

Existen diversas metodologías de selección de sitios, (Rodríguez, 2010), recomiendan para la selección de rellenos, dejar como requisito indispensable la metodología de superposición de escenarios mediante Sistemas de Información Geográfica (SIG), pues es la que brinda mayor soporte técnico, para la toma de decisiones. Esto se debe a que un análisis soportado en información digital y georreferenciada sobre variables

de diferente tipo, resulta más confiable, que metodologías de análisis sujetas al criterio del evaluador. Combinando los SIG y técnicas de evaluación multicriterio, facilita encontrar las mejores localizaciones para situar los distintos usos del suelo que se realizará en una región (Barredo, 1999). La calidad del estudio que se desarrolle utilizando SIG y EMC, se sustenta en dos pilares fundamentales. Por una parte, la riqueza de la información o base de datos, la capacidad de análisis y conocimientos del operador del SIG, y por otra, la calidad y consistencia de la evaluación realizada por los expertos. Dicha evaluación debe ser realizada por un centro decisor consensuado, que permita la discusión sobre los criterios y la importancia de éstos en la evaluación (Mena, 2006).

3. Metodología:

3.1 Recopilación de Información Base:

3.1.1 Localización de área de Estudio:



Figura 2. Localización Municipio de Tunja Fuente: (IGAC, 2018).



Figura 3. Zona Metropolitana de Tunja. Fuente: (SIGTER 2015)

3.2 Mapa de capacidad de acogida:

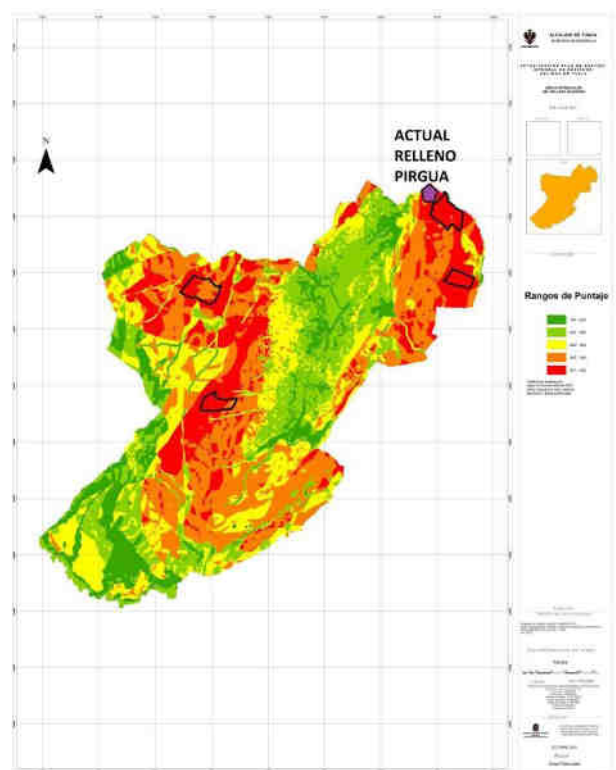


Figura 4. Localización Relleno Sanitario de Pírgua. Fuente: (ServiTunja, 2017)



3.3 Procedimiento para la localización óptima.

Se toma como referencia el decreto 838 de 2005, procedimiento, criterios, metodología, prohibiciones y restricciones para la localización de áreas de disposición final de residuos sólidos (Decreto 838, 2005).

3.3.1 Criterios de selección

En la selección de los sitios potenciales para implementar el relleno sanitario regional se analizaron los aspectos técnicos que se describen a continuación:

- Capacidad, Ocupación actual del área, Accesibilidad vial, Condiciones de suelo y topografía, Distancia entre el perímetro urbano, respecto del área para la disposición final, Disponibilidad de material de cobertura, Densidad poblacional en el área, Incidencia en la congestión de tráfico en la vía principal, Distancia a cuerpos hídricos, Dirección de los vientos, Geoformas del área respecto al entorno.

3.3.2 Criterios de restricción

Corresponden a las áreas donde si bien se pueden localizar, construir y operar rellenos sanitarios, se debe cumplir con ciertas especificaciones y requisitos particulares, sin los cuales no es posible su ubicación, construcción y operación:

- Distancia al suelo urbano, Proximidad a aeropuertos, Fuentes subterráneas, Áreas inestables, Zonas de riesgo sísmico alto.

3.3.3 Criterios de prohibición

Corresponden a las áreas donde queda prohibido la localización, construcción y operación de rellenos sanitarios:

- Fuentes superficiales, Fuentes subterráneas, Hábitats naturales críticos, Áreas con fallas geológicas, Áreas pertenecientes a parques nacionales naturales.

3.4 Análisis Multicriterio.

Las etapas seguidas en la Evaluación multicriterio son:

- Establecer los criterios para el cumplimiento del objetivo.
- Determinar los factores y variables.
- Desarrollar reglas de decisión como análisis del punto ideal o sumatoria lineal ponderada.
- Establecer el peso asociado a cada factor.
- Y obtención del mapa de capacidad de acogida para el objetivo del estudio y su valoración (Bordas, Izquierdo, & Edo. 2006).

3.5 Elaboración de Cartografía Temática.

Las Zonas preseleccionadas se delimitaron sobre el mapa “Cruce de variables” junto con la interposición del mapa catastral del municipio de Tunja para la delimitación de cada una de las áreas potenciales que cumplan con la capacidad requerida para la disposición de Residuos proyectada a 30 años en el municipio.

Con ayuda de la herramienta Model Builder de ArcGIS se aplican los criterios de la normativa vigente de pendientes, suelos, vías, cuerpos de agua, topografía y otros, para generar la cartografía necesaria (Hurtado, Giménez, & Martínez, 2005).

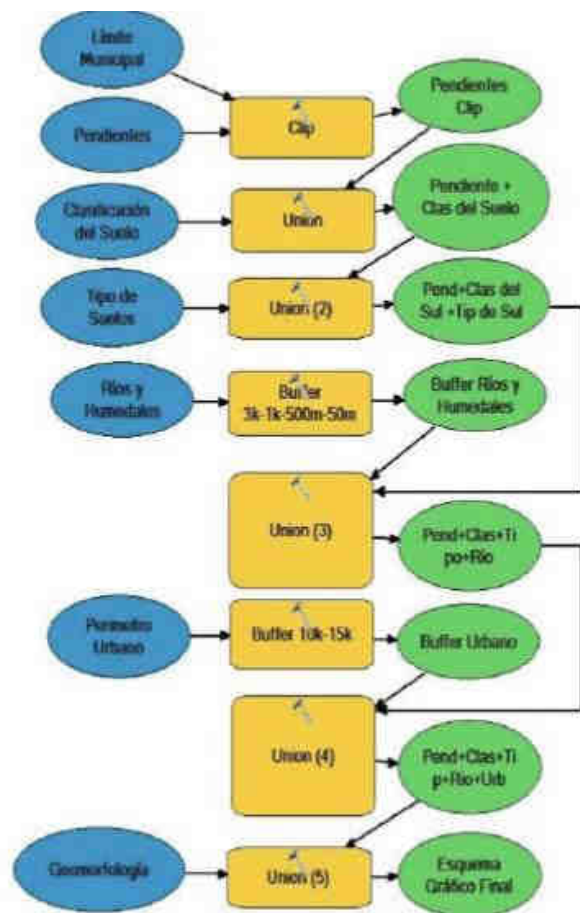


Figura 5. Herramienta Model Builder (ESRI, 2014)

4. Desarrollo/Análisis/Resultados/Argumentación.

5. Resultados

Presentación de Área de prueba.

Según el cálculo en la proyección de generación de residuos, por PGIRS, se estima que es necesario disponer en el escenario 1 (los 14 municipios de la provincia centro) un volumen total de 3.948.304 m³ de residuos sólidos, en el escenario 2 (los 60 municipios que están actualmente) un volumen de 7.865.567 m³ en 30 años. Un relleno sanitario conlleva la disposición compactada de los residuos, adicionalmente una cobertura diaria y final. Este material es proveniente en lo posible del mismo sitio de disposición final y ocupa un volumen considerable en la conformación del relleno sanitario.

La proporción de la cobertura oscila entre un 20 y 30% dependiendo de la conformación de las celdas y de la forma general del relleno sanitario. Por lo tanto, al tener la condición más crítica correspondiente al 30% se tendrá que el volumen necesario de capacidad del relleno sanitario será de 5.132.795 m³ en el primer escenario, y de 10.225.237 m³.

Es por ello que, se necesita un área mínima de 37,07 hectáreas en el primer escenario y de 73,85 hectáreas en el escenario 2, en ambos casos conformando celdas hasta los 18 metros de altura o profundidad según criterio del operador del relleno sanitario. (Jaramillo, 2002)

RESULTADOS				
PROYECCIÓN: GENERACIÓN DE RESIDUOS A 30 AÑOS				
ESCENARIO 1	LOS 14 MUNICIPIOS ZONA CENTRO	5'132.795 m ³	37,07 ha	
ESCENARIO 2	LOS 60 MUNICIPIOS QUE ESTÁN ACTUALMENTE	10'225.237 m ³	73,85 ha	
PONDERACIÓN DE ÁREAS EN BASE AL DECRETO 838-2005				
ÁREAS PRESELECCIONADAS				
CRITERIOS EVALUADOS	PIRGUA	TRAS DEL ALTO	CHORRO BLANCO	PIRGUA 2
12				
PUNTAJE E-2	852,2	818,4	765	727
TOTAL E-1	751,2	748,4	629	614



Figura 6. Área seleccionada para la disposición final de residuos sólidos

6. Conclusión.

Se puede concluir que la evaluación multicriterio permite observar la importancia que han adquirido los Sistemas de Información Geográfica más allá de su capacidad para

almacenar y representar especialmente datos. Se puede recalcar que la EMC en el entorno SIG tiene la capacidad de comparar y combinar por medio de la estandarización mapas diferentes para obtener un nuevo producto cartográfico final.

Para el objetivo específico se concluye que de los resultados obtenidos de todo este proceso que tiene como fin la localización de sitios potenciales para la disposición final para residuos sólidos no se debe encontrar el sitio perfecto si no el menos malo, cabe resaltar que con este tipo de estudios puede llegar a tener un impacto en el proceso de toma de decisiones ya que, la información generada puede ser de utilidad para los planeadores y otros actores, considerando las necesidades e intereses de cada municipio que conforman esta zona de estudio tomando como base este trabajo.

7. Bibliografía.

- [1] Alcaldía de Tunja. (s.f.). Recuperado el 29 de mayo de 2018, de Alcaldía Mayor de Tunja ciudad de origen: <http://www.tunja-boyaca.gov.co/municipio/geografia>.
- [2] Ambientalistas, Fundación Azul. (s.f.). Fundación Azul ambientalistas. Recuperado el mayo de 2018, de <http://www.azulambientalistas.org/rellenosanitario.html>
- [3] Barredo, J. (1999). Los SIG en la Ordenación del Territorio: Posibilidades y desarrollo utilizando evaluación Multicriterio. *Sistemas de Información Geográfica y Teledetección Espacial*
- [4] Bórdas, R., Izquierdo, A. G., & Edo, M. D. (2006). Implementación de una herramienta basada en tecnología SIG y técnicas de decisión multicriterio para la obtención de mapas de orientación a la ubicación de instalaciones de gestión de residuos. *España. Mapping*, 32-38.
- [5] Castillo, C. P. (2012). Metodologías para la ubicación de plantas de biomasa mediante modelos de localización basados en programación lineal y evaluación multicriterio en el entorno de los Sistemas de Información Geográfica. . Valencia, España: Tesis Doctoral.

- [6] Decreto1220. (2005). Recuperado el 20 de mayo de 2018, de <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=16316>
- [7] Decreto1713. (2002). Recuperado el marzo de 2017, de <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=5542>
- [8] Decreto838. (2005). Recuperado el 12 de abril de 2017, de <https://www.corpochivor.gov.co/wpdm-package/decreto-838/> 69
- [9] ESRI. (2014). ArcGiS Resources. Recuperado el 10 de junio de 2017, de ¿Qué es ArcGIS?: <https://resources.arcgis.com/es/help/getting-started/articles/026n00000014000000.htm>
- [10] Fuenzalida. (2015). Fuenzalida, M., Buzai, G. D., Moreno Jiménez, A., Geografía, geotecnología y análisis espacial: tendencias, métodos y aplicaciones. Santiago Chile. RED ACE+GEOTEC NET.
- [11] Gascón. (2015). Óptima ubicación de un relleno sanitario para el Área Metropolitana del Valle de Aburrá empleando Sistemas de Información Geográfica. Medellín Colombia. Ingenierías USBMed, 38-45.
- [12] Gómez, M., & Barredo, J. (2006). Sistemas de Información Geográfica y evaluación multicriterio. Alfaomega. México. 279p. 257-276.
- [13] Hurtado, M. A., Giménez, J. E., & Martínez, O. R. (2005). Elaboración de Cartografía Temática integrada a Sistema de Información Geográfica (SIG) y Propuesta de Ordenamiento Territorial. Buenos Aires Argentina.
- [14] IGAC. (2018). Instituto Geográfico Agustín Codazzi. Recuperado el 20 de junio de 2017, de Los Sistemas de Información Geográfica: <https://www.igac.gov.co/catalogo>
- [15] Jaramillo, J. (2002). “Guía para el diseño, construcción y operación de rellenos sanitarios manuales”. Medellín Colombia. Universidad de Antioquia.
- [16] Llopis, J. P. (2010). Sistemas de información geográfica aplicados a la gestión del territorio. San Vicente (Alicante), España: Club Universitario.
- [17] Malczewski, J. (1999). GIS and multicriteria decision analysis.. New York, Estados Unidos: John Wiley & Sons.
- [18] Mena. (2006). Modelación espacial mediante geomática y evaluación multicriterio para la ordenación territorial. México. Facultad de Ingeniería Universidad de Tarapacá, 81-89.



- [19] Mena, Frau, C. (2010). Localización De Un Relleno Sanitario en la comuna de Parral, Chile a través de Evaluación Multicriterio. *interciencia*, 684-689.
- [20] Olaya, V. (2014). *Sistemas de Información Geográfica, Libro libre. . Girona España: Copyright, Vol. I, 911 pg.*
- [21] POT. (2013). *Primera Revisión Plan de Ordenamiento Territorial,. Alcaldía Mayor de Tunja, Boyacá, Tunja.*
- [22] Rodríguez, M. (2010). *Fundamentos y criterios para ubicación, diseño, instalación y operación de infraestructura para el tratamiento térmico de residuos o desechos peligrosos en plantas de incineración y coprocesamiento (1 ed.). Bogotá.*
- [23] Saaty, T. (1997). *Ese no es el proceso de jerarquía analítica: qué es el AHP y qué no lo es. Journal of Multi- Criteria Decision Analysis, 324-325.*
- [24] ServiTunja. (2017). Recuperado el 10 de abril de 2016, de <http://www.servitunja.com.co/Relleno.html>
- [25] Tunja Alcaldía. (2005). *Equipo técnico PGIRS con base de Proyecciones Nacionales y Departamentales de Población 2005-2020 DANE 2013 y Proyección de crecimiento Poblacional Año 2020 al 2043 modelo Geométrico. Tunja.*
- [26] Voogd, H. (1983). *Multicriteria evaluation for urban and regional planning (Vol. 207). London: Pion.*
- [27] Wikipedia. (2014). *Metropolitana Tunja. Recuperado el 19 de febrero de 2016, de Wikipedia. Fuente: Cartografía base IGAC (Escala 1:2000 POT 2013).*

8. Anexos.

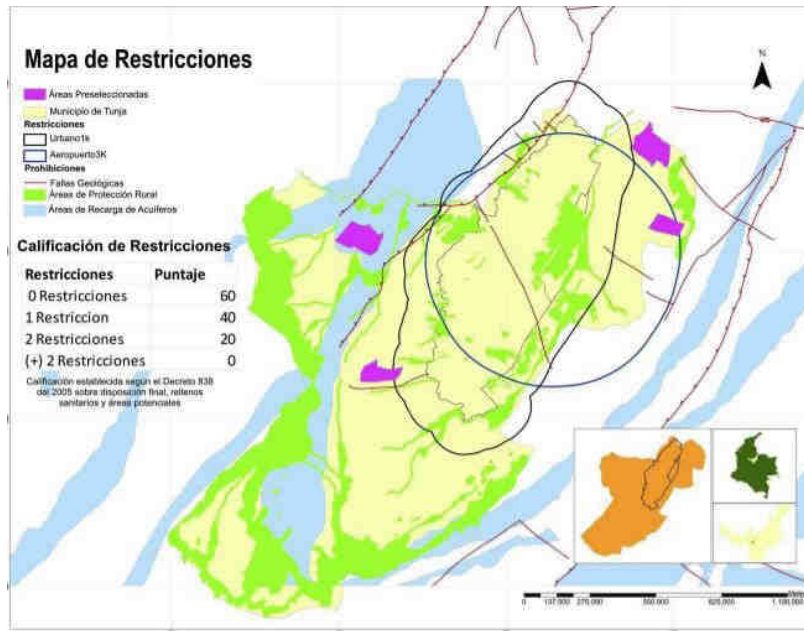


Figura 7. Restricciones y prohibiciones en la disponibilidad del área.
Fuente: Cartografía base IGAC (Escala 1:2000 POT 2013).

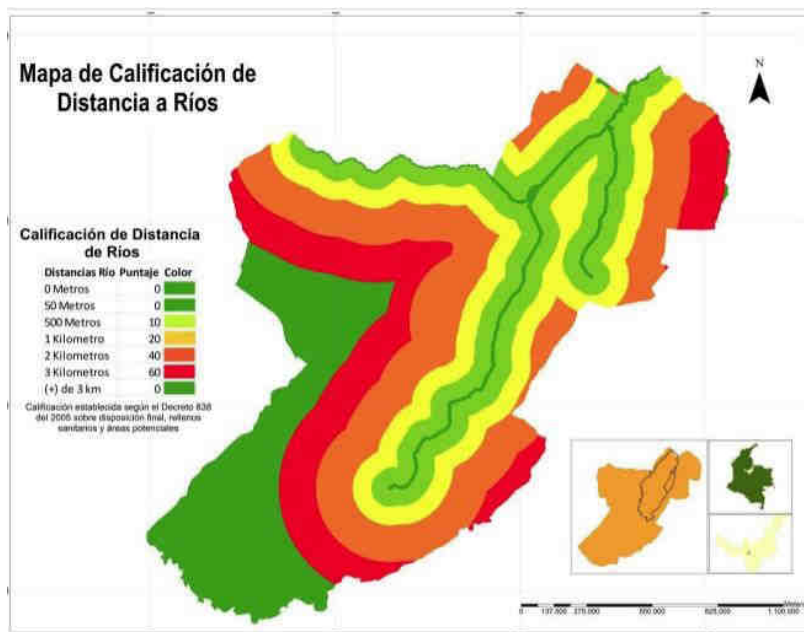


Figura 8. Distancia a cuerpos Hídricos.
Fuente: Cartografía base IGAC (Escala 1:2000 POT 2013)



Figura 9. Accesibilidad Vial
Fuente: Cartografía base IGAC (Escala 1:2000 POT 2013)

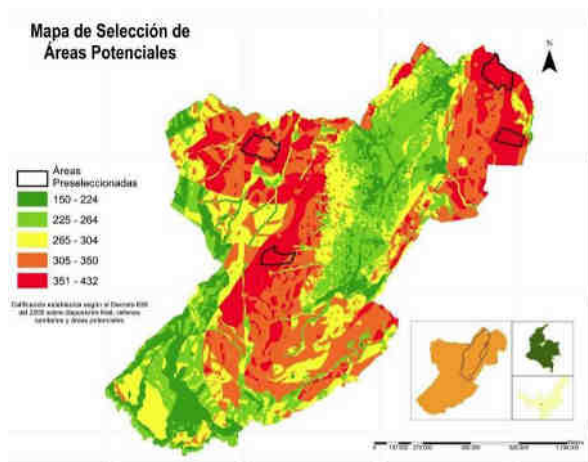


Figura 10. Zonas pre seleccionadas.
Fuente: Cartografía base IGAC (Escala 1:2000 POT 2013)

7

Biosólido de plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) en la fabricación de ladrillos

William R. Mozo-Moreno ^a & Melquisedec, Cortés-Zambrano ^a

^a Facultad de ingeniería civil, Universidad Santo Tomás, Tunja, Colombia. william.mozo@usantoto.edu.co; melquisedec.cortes@usantoto.edu.co

Recibido: Fecha, día, 2020. Artículo revisado: Fecha, día, 2020. Aceptado: Fecha, día, 2020.

Abstract

This document presents some of the methodology and some results of research that aims to assess the compressure resistance of bricks made from the inclusion of sludge from wastewater treatment plants. This research assessed the technical feasibility of including the sludge of PTAR El Salitre as a raw material for brickmaking. Mechanical testing was developed on the basis of Colombian technical standards NTC 4017 and NTC 4205.

Keywords: Sludge, Wastewater, Bricks, Ceramics.

Resumen

En este documento se presenta parte de la metodología y algunos resultados de una investigación que tiene como objetivo la evaluación de la resistencia a la compresión de ladrillos elaborados a partir de la inclusión de biosólido de plantas de tratamiento de aguas residuales. En esta investigación se evaluó la factibilidad técnica de incluir el biosólido de la PTAR El Salitre como materia prima para la elaboración de ladrillos. Las pruebas mecánicas se desarrollaron con base en lo establecido en las normas técnicas colombianas NTC 4017 y NTC 4205.

Palabras clave: Biosólido, Aguas Residuales, Ladrillos, Cerámicas.



1. Introducción

Dentro de la gestión integral del recurso hídrico el tratamiento de las aguas residuales (domésticas, industriales, comerciales, institucionales) antes de ser vertidas a los cuerpos de agua es un aspecto de suma importancia, pues se logra disminuir la contaminación y se garantiza un proceso sostenible en cuanto al consumo y uso del líquido. Como uno de los proyectos más destacados y ambiciosos de nuestro país, se encuentra la descontaminación del río Bogotá; la cual se piensa lograr a través del tratamiento de las aguas residuales de la ciudad en dos estaciones principales: planta de tratamiento de aguas residuales el Salitre con 8 m³/s y planta de tratamiento de aguas residuales Canoas con una capacidad de 18 m³/s. [1]

De los procesos que se llevan a cabo en una planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) se generan subproductos, uno de ellos es el lodo o biosólido de aguas residuales, considerado un residuo y el cuál fue usado como material de remplazo de la materia prima para la elaboración de ladrillos macizos. Más de 4500 toneladas mensuales se producen en la PTAR el salitre [2] y es absolutamente necesario dar opciones de valorización a este material para prevenir que se convierta en un residuo con alta probabilidad de contaminante.

Dentro de las posibles consecuencias de una inadecuada gestión de los lodos o biosólidos procedentes del tratamiento de las aguas residuales se encuentra la eutroficación y contaminación por nitratos en los mantos acuíferos [3], razón suficiente para motivar la búsqueda de alternativas que contribuyan a la gestión integral de las aguas residuales.

Se planteo entonces evaluar el efecto que tiene reemplazar arcilla por biosólido seco como materia prima en la fabricación de ladrillos; fabricando elementos con (0 % - 5 % - 10 % y 15 %) del residuo, además se probaron 3 temperaturas de cocción con el fin de hacer más eficiente el proceso (950-1000-105 °C).

2. Materiales y Métodos

Para la fabricación de los ladrillos se usó como materia arcilla procedente de una ladrillera industrial de la ciudad de Tunja y biosólido de la planta de tratamiento de aguas residuales EL SALITRE (Bogotá D.C).

La metodología del estudio incluyó:

- Caracterización física y química de la materia prima (contenido de materia orgánica, granulometría, índices de plasticidad, humedad y gravedad específica, fluorescencia de rayos X FRX y difracción de rayos X DRX)
- Determinación de contenido óptimo de humedad mediante ensayo de Proctor estándar.
- Conformado de elementos con la técnica de prensado en una dimensión.
- Dimensiones modulares según norma NTC 296 (dimensiones modulares de ladrillos cerámicos).
- 2 etapas de secado: secado natural, y secado en horno.
- Cocción en horno mufla que permite control en las rampas de calentamiento en incremento de 5 °C/min.
- Determinación de resistencia a la compresión - norma técnica NTC 4205 y NTC 4017.

3. Resultados y análisis

A continuación, se presentan algunos de los resultados más relevantes obtenidos en la investigación:

- De los resultados obtenidos del ensayo de granulometría para el biosólido se concluye que es un material franco arenoso, lo que significa que “contiene mucha arena, pero con suficiente limo y arcilla para aportarle un poco de cohesión” [2]. Característica que lo convierte en un material desgrasante que disminuye la plasticidad de las mezclas.

3.1 Calidad de los elementos cerámicos

Resistencia a la compresión. En la Figura 1. Se muestran los resultados obtenidos en los ensayos de resistencia a la compresión y de ellos se puede concluir:

- El incremento de temperatura aumenta la resistencia a la compresión.
- El incremento en el % de biosólido se traduce en la disminución la resistencia a la compresión.
- Se pueden obtener elementos que cumplen con los requisitos establecidos en la NTC 4205 para mampostería estructural y no estructural.
 - No estructural (todas las combinaciones % biosólido – temperatura)
 - Estructural (hasta 15 % de remplazo cocidos a 1000°C o 1050°C)

3.2 Potencial

La investigación puede contribuir a:

- Gestión integral de los recursos hídricos; complemento al tratamiento integral de las aguas residuales.
- Disminución en la ocupación de áreas de disposición de residuos en el relleno sanitario.
- Alternativa de valorización del biosólido.
- Prevención de una contaminación futura de recursos superficiales o subterráneos de agua.
- Inhibición de metales pesados en la matriz cerámica.
- Cumplir con el objetivo 6 del desarrollo sostenible, agua limpia y saneamiento básico.

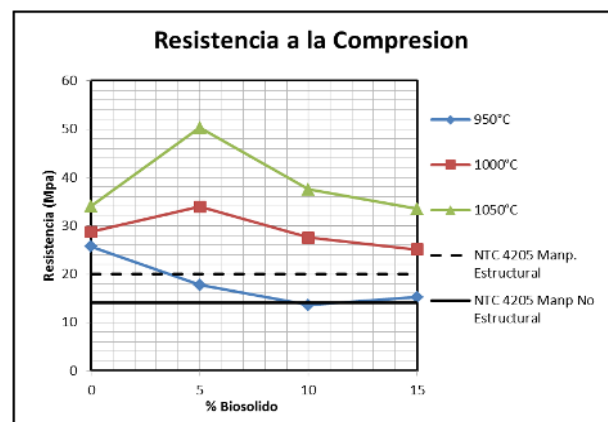


Figura 1. Resistencia a la compresión

4. Conclusiones

- El biosólido tiene propiedades desgrasantes que disminuyen la plasticidad en la mezcla usada para la fabricación de ladrillos.
- Es posible incorporar hasta un 15 % de biosólido como materia prima para fabricar ladrillos que cumplen con los requisitos establecidos en la NTC 4205.
- Se demostró que la alternativa evaluada puede aportar a la transformación del proceso de fabricación de materiales de construcción, volviéndolo más sostenible y asegurando la extensión de la vida útil de los yacimientos de materias primas. [4] [5] [6] [7]



5. Referencias

- [1] A. A. y. A. D. Bogotá, «PTAR EL SALITRE,» 20 Mayo 2011. [En línea]. Available: <http://www.acueducto.com.co/wpsv61/wps/html/resourc>.
- [2] H. E. Castro Franco, Fundamentos para el conocimiento manejo de suelos agrícolas, Tunja: Instituto Universitario Juan de Castellanos, 1998.
- [3] F. d. C. Q. U. A. d. Chihuahua, «Manejo de sólidos residuales o biosólidos,» 15 Enero 2012. [En línea]. Available: <http://www.oocities.org/edrochac/residuales/biosolidos9>.
- [4] J. W. Callister , Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales, España: Reverte, 1995.
- [5] C. M. C. A. G. M. B. & L. H. F.J, «Posibilidades de Valorización de diferentes lodos de depuradora,» *XIII Congreso Internacional de ingeniería de proyectos*, nº 1003-1014, p. Posibilidades de Valorización de diferentes lodos de depuradora, 2009.
- [6] R. & S. Wakefield, The utilization of sewage sludge in the manufacture of clay bricks, WATER SA, 1991, pp. 197-202.
- [7] H. D. F. & P. C. Chih, Utilization of sludge as brick materials, *Advances in Environmental*, 2003, pp. 679-685.

8

Impactos territoriales y ambientales en terminales de carga en Colombia

Héctor Mauricio Sánchez Abril

a Facultad de ingeniería, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Tunja, Colombia. hector.sanchez@uptc.edu.co

Recibido: Fecha, día, 2020. Artículo revisado: Fecha, día, 2020. Aceptado: Fecha, día, 2020.

Abstract

This article shows the revision made to the legislation corresponding to environmental and land use issues, as well as the main reasons why these two elements are affected by freight terminals. The methodology carried out allowed obtaining information from different sources, especially the laws and decrees that are considered in sea and river ports, free zones, and air terminals. In addition, several cases of freight terminals were reviewed and the different territorial and environmental impacts that are generated were identified. The general methodology for the preparation and presentation of environmental impact studies and the procedure for obtaining environmental licenses is also shown, taking into account that these procedures must be carried out to avoid penalties for attacking the components of the environment, both biotic and abiotic.

Keywords: freight terminals; territorial impacts; environmental impacts; legislation

Resumen

En este artículo se muestra la revisión hecha a la legislación correspondiente a los temas ambientales y de uso de suelo, así como a las razones principales de que estos dos elementos se ven afectados por las terminales de carga. La metodología llevada a cabo permitió obtener información de distintas fuentes, especialmente de las leyes y decretos que se tienen en cuenta en los puertos marítimos y fluviales, zonas francas y terminales aéreas. Además, se revisaron varios casos de terminales de carga y se identificaron los diferentes impactos territoriales y ambientales que se generan. Se muestra también la metodología general para la elaboración y presentación de estudios de impacto ambiental y el procedimiento para la obtención de licencias ambientales, teniendo en cuenta que dichos procedimientos se tienen que realizar para evitar sanciones a causa de atentar contra los componentes del medio ambiente, tanto bióticos como abióticos.

Palabras clave: terminales de carga; impactos territoriales; impactos ambientales; legislación.



1. Introducción

Este artículo pretende dar a conocer los impactos territoriales y ambientales que se producen en los terminales de mercancías o carga, esencialmente, la actividad humana e industrial sobre algunos recursos naturales que se encuentran en dichos terminales. Se tratan temas tales como los impactos ambientales donde se va a encontrar actividades que generan afectación al medio ambiente, algunas de estas actividades son relacionadas a la contaminación del agua, del aire, de la flora, de la fauna y del suelo, finalmente se puede evidenciar en el presente documento las normas que rigen los impactos ambientales y como debemos cumplirlas y aplicarlas.

Otro impacto territorial que comprende estudio y análisis de la estructura territorial y los impactos de los diferentes terminales de mercancía; se tiene en cuenta algunos sectores para evaluar dicho impacto los cuales son población, medio ambiente, recursos naturales, localización de actividades económicas, infraestructura, equipamiento y patrimonio cultural, así mismo hablan de la normativa que se debe aplicar para el buen uso de los impactos territoriales dentro de los terminales.

La construcción de terminales de mercancías ha traído varias afectaciones de alta importancia para el medio ambiente y por esto, con el paso de los años se ha dado prioridad a dichas problemáticas sobre el territorio y el ambiente producto de la operación del transporte de mercancía por tierra, aire y mar. Se llevó a cabo una investigación sobre estas actividades relacionadas con la operación del transporte de mercancías tales como el cargue, el descargue y otras que se relacionan y se hizo una revi-

sión a la normatividad y planes aplicados a nivel nacional e internacional con miras a divulgar un poco más cómo se mitiga el daño sobre el ambiente y el territorio en el sector del transporte de mercancías.

2. Impacto territorial

Un impacto territorial se define como un acontecimiento o medida sobre un territorio geográfico específico, sin importar el uso que se le dé a este.

Un estudio de impacto sobre el territorio se constituye en un documento de carácter técnico que complementa los instrumentos existentes en materia de planeación y de ordenamiento del territorio y contiene análisis y estudios útiles en la predicción, valoración y generación de correcciones de impactos que posiblemente se den en la estructura territorial y la población, su situación económica, social, el ambiente, los recursos naturales, la localización de todas las actividades económicas, dotaciones, equipamientos, servicios, infraestructuras y el patrimonio cultural.

3. Estudio de impacto territorial (EIT)

Es importante definir lo mínimo que debe tener un estudio de impacto territorial. A continuación, se enlistan sus principales elementos:

- a. Descripción y análisis del medio natural y físico, patrimonio histórico, sistema urbano, infraestructuras, aspectos socioeconómicos y diagnóstico de conflictos en esos elementos.

- b. Análisis del impacto en el medio físico, el paisaje, el patrimonio y aspectos de la población
- c. Identificación de las repercusiones con los instrumentos de ordenamiento territorial o por lo menos con aspectos del Sistema Territorial estudiado como referencia.
- d. Objetivos y consideraciones para implantación en el territorio así como el análisis de impacto en el medio físico-natural correspondiente a lo hídrico, el paisaje, la calidad del aire y las áreas naturales bajo protección.

4. LEGISLACIÓN COLOMBIANA SOBRE IMPACTOS TERRITORIALES

Partiendo de la carta magna, es decir, la Constitución Política de Colombia en su artículo 58 hay que mencionar que se establece que se prioriza el bien público sobre el particular y le da facultades al gobierno de expropiar para conveniencia de la mayoría.

Se puede entender o interpretar que, en el caso de los terminales de carga, cuando se presenta un crecimiento y es necesario su expansión se podrá aplicar este principio. En leyes como la 1 de 1991, se establecen mecanismos y condiciones para la expropiación.

Otro artículo que resulta interesante es el 68 de la Constitución Política donde se da a entender que los territorios de la nación no pueden ser vendidos ni entregados a terceros, esto con el fin de que terminales de carga, como lo son los puertos marítimos y aeropuertos permanezcan escriturados al estado a pesar de que su administración sea por parte de privados.

El artículo 334 de la Constitución Política define que el Estado está a cargo de la explotación económica de recursos naturales y usos de los suelos. Este artículo le da potestad al gobierno de decidir ubicación de terminales de carga donde lo considere conveniente. Un ejemplo de ello es lo establecido en la Ley 1004 de 2005 que permite la creación de zonas francas.

La Ley 105 de 1993 en el artículo 17, menciona la infraestructura necesaria para complementar las terminales de marítimas y aéreas, teniendo en cuenta diferentes infraestructuras para el transporte como son las vías urbanas, suburbanas los puertos y sus instalaciones tanto a nivel fluvial como marítimo, los terminales de transporte terrestre y los aeropuertos.

La Ley 388 de 1997, define la obligatoriedad de realizar planes de ordenamiento territorial (POT) y en su título 3 en el artículo 13 establece el componente urbano del mismo. Dicho componente es definido allí como una herramienta que sirve para administrar el desarrollo y la forma cómo debe ocuparse el espacio físico ya sea suelo urbano o suelo de expansión urbana y que incluye las políticas de corto y mediano plazo, así como los procedimientos y herramientas para la gestión. Además, define generalidades de las normas urbanísticas.

4.1 Puertos marítimos y fluviales

Los puertos marítimos y fluviales en su gran mayoría se encargan al transporte de carga ya sea carbón, hidrocarburos, químicos, productos a granel, contenedores vehículos, etc. En Colombia su funcionamiento, operación y condiciones territoriales se encuentran reglamentadas por leyes, pero la más importante es la ley 1 de 1991.



En dicha Ley, en su artículo 2 se determina que los planes que se hacen con el fin de expandir los puertos se deberán expedir mediante decretos reglamentarios de los programas y planes de desarrollo económico y social, de las obras públicas o de infraestructuras que apruebe el Congreso de la República de Colombia y los de la misma Ley 1 de 1991.

Así mismo, en el artículo 16 de la Ley 1 de 1991 se establece (Se pone el texto del artículo tal y como allí aparece): “Expropiación y aporte de terrenos aledaños. Se declara de interés público la adquisición de los predios de propiedad privada necesarios para establecer puertos. Si la sociedad a la que se otorga una concesión portuaria no es dueña de tales predios, deberá iniciar conversaciones con las personas que aparezcan como titulares de derechos reales sobre ellos, para conseguir que voluntariamente los vendan o aporten a la sociedad. Transcurridos treinta días a partir del momento en el que se comunicó a los titulares de derechos reales la intención de negociar con ellos, si la negociación no ha sido posible, se considerará fracasada y la Nación, a través del Superintendente General de Puertos, o cualquier entidad pública capacitada legalmente para ser socia de una sociedad portuaria, podrá expedir un acto administrativo y ordenar la expropiación.”

4.2 Zonas francas

Las zonas francas se consideran terminales de carga ya que son centros de producción industrial y comercial y presentan diversos impactos sobre el uso del suelo. Actualmente en Colombia se tienen 111 zonas francas.

La Ley 1004 de 2005, dicta disposiciones generales para establecer zonas francas y aunque no habla acerca de elementos territoriales ni cómo los afecta, ésta da paso a los decretos 2147 de 2016 y 659 de 2018 los cuales tienen en cuenta la conformación territorial.

El mencionado decreto 2174 de 2016 en el capítulo IV habla de zonas francas costa afuera para la explotación de hidrocarburos, aunque estas se encuentren en el mar afectan la zona costera ya que se requiere la localización o emplazamiento de infraestructura y elementos en tierra para apoyo funcional.

4.3 Terminales aéreas

La Ley 105 de 1993 en su artículo 17 menciona la integración de la infraestructura distrital y municipal de transporte. Se definen como elementos que hacen parte de la infraestructura Distrital Municipal de transporte los siguientes: vías urbanas y suburbanas, vías que sean propiedad del municipio, instalaciones portuarias en ríos y mares, los terminales de transporte terrestre y los aeropuertos. Además de esto, se mencionan que son del municipio o distrito dichos elementos según la participación que estos tengan en las sociedades portuarias y aeroportuarias, siempre que sean de su propiedad o le sean transferidos.

5. IMPACTOS AMBIENTALES

5.1 Definición de impacto ambiental

El impacto ambiental es la transformación, modificación o alteración de cualquiera de los componentes del medio ambiente (biótico, abiótico y humano), como resultado

del desarrollo de un proyecto en sus diversas etapas [1] Aunque el término de “impacto ambiental” se ha interpretado en el sentido negativo, muchas acciones tienen efectos positivos significativos que deben definirse y discutirse claramente (generación de empleos, y beneficios sociales, entre otros).

5.2 Impactos ambientales generados por los terminales de mercancías

5.2.1 En los terminales portuarios [2]

Dentro de los impactos ambientales en los terminales portuarios se encuentran los siguientes:

- Emisión de partículas
- Desarrollo de plagas
- Descarga de material en el agua
- Generación de residuos peligrosos
- Generación de residuos no peligrosos
- Malos olores
- Vertimientos
- Ruidos

5.2.2 En las Zonas Francas

Los Impactos presentados en las zonas francas son principalmente: [3] el consumo de energía (eléctrica, acpm, gasolina y gas propano), generación de residuos, afectaciones al suelo y a la cubierta vegetal y residuos peligrosos.

6. LEGISLACIÓN SOBRE IMPACTOS AMBIENTALES EN COLOMBIA

Inicialmente se parte de la constitución política de Colombia donde en su artículo 79 menciona lo siguiente: “Todas las personas tienen derecho a gozar de un ambiente sano. La ley garantizará la participación de la comunidad en las decisiones que puedan afectarlo. Es deber del Estado proteger la diversidad e integridad del ambiente, conservar las áreas de especial importancia ecológica y fomentar la educación para el logro de estos fines”.

Se encuentra el Decreto 2811 del 18 de diciembre de 1974, por el cual se dicta el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente. Dicho decreto en su artículo 1 menciona que el ambiente es patrimonio común y hace énfasis en que el Estado y los particulares deben participar en su preservación y manejo, que son de utilidad pública e interés social.

Además, está la Ley 99 de 1993 por la cual se creó el Ministerio de ambiente, se reordenó el sector público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se reorganizó el sistema nacional ambiental (SINA) y se dictaron otras disposiciones.

Se encuentra dentro de la legislación en materia ambiental los Decretos 1076 de 2015 por medio del cual se expide el decreto único reglamentario del sector ambiente, el Decreto 1333 de 2009 por el cual se establece el procedimiento sancionatorio ambiental, el Decreto 2820 de 2010 por el cual se reglamenta el Título VIII de la Ley 99 de 1993 sobre licencias ambientales y se habla por primera vez de estudios de impacto ambien-



tal y el Decreto 2041 de 2014 por el cual se reglamenta el Título VIII de la Ley 99 de 1993 (Art 49-62) sobre licencias ambientales.

Además de los anteriores decretos mencionados, se encuentra el Decreto 1728 de 2002 en el cual se reglamenta y exige el procedimiento de estudios de impacto ambiental a 42 sectores. Dentro de los principales según el artículo 8 y 11 dentro de lo concerniente a terminales de mercancías están los siguientes sectores o actividades:

- Construcción, ampliación, modificación, adecuación y operación de aeropuertos nacionales públicos y privados.
- Construcción, ampliación, modificación, adecuación y operación de terminales para el transporte terrestre de pasajeros y carga
- Construcción, ampliación, modificación, adecuación y operación de puertos o terminales marítimos.
- Dragados de profundización de los canales de acceso a los puertos
- Los terminales de entrega y estaciones de transferencia de hidrocarburos, entendidos como la infraestructura de almacenamiento asociada al transporte de hidrocarburos y sus productos y derivados por ductos

Se encuentra también la Resolución 1402 de 2018 por la cual se adoptó la metodología general para la elaboración de estudios de impacto ambiental. Allí se definió que las autoridades que otorgan licenciamiento ambiental y protocolo para la expedición, mencionando que según el decreto 2041 de 2014 dicha competencia es del Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible, autoridad Nacional de licencias ambientales (ANLA),

corporaciones autónomas regionales (CAR) correspondiente a la zona de influencia directa del proyecto, municipios con población mayor a un millón de habitantes y las entidades territoriales delegadas de las CARs.

Dichas entidades tienen la obligación de llevar a cabo un protocolo en el que se exigen un diagnóstico ambiental de alternativas que se presenta por escrito y suministra información para evaluar y comparar las diferentes opciones bajo las cuales sea posible desarrollar el proyecto. Se establece que una vez se radique el documento de solicitud la autoridad ambiental definirá la manera como dicho estudio se debe realizar. Así mismo, de forma posterior se procederá a la solicitud de la licencia ambiental respectiva que deberá tener los siguientes elementos:

- Nombre o razón social, número de identificación y domicilio del solicitante;
- Descripción del proyecto, obra o actividad;
- Costo estimado del proyecto, obra o actividad;
- Descripción de las características ambientales generales del área de localización;
- Relación de los recursos naturales renovables que requieren ser usados, aprovechados o afectados durante la ejecución del proyecto, obra o actividad;
- Indicar si el proyecto, obra o actividad afecta áreas de manejo especial, reservas forestales y humedales de importancia nacional e internacional.

La solicitud de licencia ambiental deberá ir acompañada de varios documentos que son:

- Poder debidamente otorgado, cuando se actúe mediante apoderado;.
- Certificado de existencia y representación legal expedido dentro del mes inmediatamente anterior
- A la presentación de la solicitud, para el caso de personas jurídicas;
- Certificación expedida por el Ministerio del Interior sobre la presencia o no de comunidades indígenas y negras en el área de influencia directa del proyecto;
- Estudio de Impacto Ambiental (EIA): es el instrumento básico para la toma de decisiones sobre los proyectos, obras o actividades que requieren licencia ambiental, debiendo incluir permisos menores.
- Caracterización del área de influencia del proyecto, para los medios abiótico, biótico y socioeconómico.
- Demanda de recursos naturales por parte del proyecto.
- Información relacionada con la evaluación de impactos ambientales y análisis de riesgos.
- Zonificación de manejo ambiental.
- Evaluación económica de los impactos positivos y negativos del proyecto.
- Plan de manejo ambiental del proyecto
- Programa de seguimiento y monitoreo.
- Plan de contingencias para la construcción y operación del proyecto.
- Plan de desmantelamiento y abandono.
- Plan de inversión del 1 %.

El Estudio de Impacto Ambiental (EIA) debe contener lo siguiente como mínimo:

- Información del proyecto sobre su localización, infraestructura, actividades y demás información que sea relevante o de pertinencia.

Al finalizar este proceso se deberá tomar una decisión por parte de la autoridad ambiental competente quien verificará la viabilidad ambiental del proyecto, obra o actividad y dará o no la licencia ambiental respectiva, en un término que no podrá ser mayor de treinta (30) días hábiles.

7. REFERENCIAS

LEY 105 DE 1993; Por la cual se dictan disposiciones básicas sobre el transporte, se redistribuyen competencias y recursos entre la Nación y las Entidades Territoriales, se reglamenta la planeación en el sector transporte y se dictan otras disposiciones.”

Ley 1 de 1991; “Por la cual se expide el Estatuto de Puertos Marítimos y se dictan otras disposiciones”

Ley 1004 de 2005; “Por la cual se modifican un régimen especial para estimular la inversión y se dictan otras disposiciones.”



Decreto 2811 del 18 de diciembre de 1974; “Por el cual se dicta el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente”.

Decreto 2041 de 2014; “Upar el cual se reglamenta el Título VIII de la Ley 99 de 1993 sobre licencias ambientales”.

Decreto 1076 de 2015; “por medio del cual se expide el decreto único reglamentario del sector ambiente”.

Decreto 1333 de 2009. “Por el cual se establece el procedimiento sancionatorio ambiental”.

Decreto 1728 de 2002. “Por el cual se reglamenta el título viii de la ley 99 de 1993 (art 49-62) sobre licencias ambientales”.

Decreto 2820 2010. “Por el cual se reglamenta el título viii de la ley 99 de 1993 sobre licencias ambientales y se habla por primera vez de estudios de impacto ambiental”.

Decreto 2041 de 2104. “Por el cual se reglamenta el título viii de la ley 99 de 1993 (art 49-62) sobre licencias ambientales”.

Resolución 1402 de 2018. Por el cual se adopta la metodología general para la elaboración de estudios de impacto ambiental.

Ley 13/2015, de 30 de marzo, de ordenación territorial y urbanística de la Región de Murcia Directrices y plan de ordenamiento territorial de la comarca de noroeste de la región de Murcia. Estudio de impacto territorial (PDF). (<https://sitmurcia.carm.es/documentos/13454/40573/Estudio+de+Impacto+Territorial.pdf/>)

- [1] Juan Fernando Mendoza Sánchez Rodolfo Téllez Gutiérrez. Evaluación del impacto ambiental de las terminales de pasajeros del autotransporte federal. México 2006. Pág. Para más información ver (https://www.imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt304.pdf?fbclid=IwARiOyC5FlfZOSK6q9rU9w_CrpPQwGrq5_Hnq-4_8o5QILnEov98aPVnI7xw).
- [2] María Isabel Escobar Jiménez, Mary Alejandra Ríos Mármol Juliana Andrea Rojas Mejía, INVEMAR. Guía Ambiental de terminales portuarios. Santa Marta, Diciembre de 2016. Pág.90-105 Para más información ver (file:///E:/terminales/Version%20Preliminar%20Terminales%20Portuarios%20V1.pdf).
- [3] Proyecto zona franca Punta Pereira S.A. (antes EDARIX S.A.) .Estudio Impacto Ambiental. Punta Pereira-Colonia. Noviembre 2007. Pág. 40-48, para más información ver (file:///E:/terminales/iar_proyecto_zona_franca_punta_pereira.pdf)

- [4] William Suárez Gómez, Jorge Ayala Cruz, “El cabotaje marítimo en la cadena de suministros agrícola de Puerto Rico”, Vol. (32), págs. 250-261, July, 2016 .DOI: (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0123592316300456>).

- [5] Lorena Bearzotti, Rosa Gonzalez, Pablo Miranda, “The Event Management Problem in a Container Terminal”, Vol. (11), págs. 97-100 February, 2013.DOI: (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1665642313715189>).

- [6] Renan Stenico de Campos, Alexandre Tadeu Simon, Felipe de Campos Martins, “Assessing the impacts of road freight transport on sustainability: A case study in the sugar-energy sector”, Vol. (220), Pages 995-1004. May .2019, .DOI: (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652619305700>).

9

Modelización hidráulica y de calidad del agua del drenaje urbano en el distrito Altagracia Tunja- Boyacá

Nelyda Lorena Quinchanequa Pineda ^a & Melquisedec, Cortés-Zambrano ^a

^a Facultad de ingeniería civil, Universidad Santo Tomás, Tunja, Colombia. nelyda.quinchanequa@usantoto.edu.co; melquisedec.cortes@usantoto.edu.co

Recibido: Fecha, día, 2020. Artículo revisado: Fecha, día, 2020. Aceptado: Fecha, día, 2020.

Abstract

In the Northeast area of the city of Tunja, urban growth is considerably faster than in the rest of the city, generating greater areas of impervious surface, which causes overflows in the wells, floods and greater sediment dragging towards the System. In order to know the real hydrodynamic operation (urban drainage) of the Altagracia district (Quince de Mayo neighborhood, Las Quintas, Altagracia), the instrumentation was carried out with equipment for measuring precipitation and flows generated at the outlet, the conceptual representation was obtained under real precipitation events, with representative flows of runoff and thus with the SWMM 5.1 program it is intended to carry out the modeling of the calibrated and validated district to adopt effective and efficient measures that allow mitigating or ending the problems present in this district

Keywords: Storm Water Management Model (SWMM), Urban drainage, water quality, modeling

Resumen

En la zona Nororiental de la ciudad de Tunja se evidencia un crecimiento urbano considerablemente más acelerado que en el resto de la ciudad, generando mayores áreas de superficie impermeable, lo que provoca reboses en los pozos, inundaciones y mayor arrastre de sedimentos hacia el Sistema, con el fin de conocer el funcionamiento hidrodinámico real (drenaje urbano) del distrito Altagracia (barrio Quince de mayo, las Quintas, Altagracia) , se realizó la instrumentación con equipos de medición de precipitación y caudales generados a la salida, se obtuvo la representación conceptual bajo eventos de precipitación real, con caudales representativos de escorrentía y así con el programa SWMM 5.1 se pretende realizar la modelización del distrito calibrado y validado para adoptar medidas eficaces y eficientes que permitan identificar con los problemas presentes en este distrito, y evaluar la capacidad de depuración de los contaminantes de acuerdo a la normatividad vigente.

Palabras clave: Storm Water Management Model (SWMM), drenaje urbano, calidad del agua, modelización.

1. Introducción

El propósito principal de esta investigación es conocer la dinámica del drenaje urbano en el distrito Altagracia mediante la modelización hidráulica y de calidad del agua debido a que en esta zona urbana predominio de las superficies impermeables o impenetrable no permiten el paso del agua debido a su composición, limita o impide las funciones naturales del suelo reduciendo su capacidad potencial de infiltración en consecuencia aumenta la lámina de agua y, con ello, aumenta el riesgo de inundaciones [10], la captación de contaminantes, este proceso de desarrollo urbanístico es inevitable y la ciudad de Tunja no ha sido ajena a esta problemática, teniendo como dato importante que la población de la ciudad se duplicó de 1985 al 2015, según datos del DANE [3] en la zona Nororiental de la ciudad, donde la proyección urbanística se ve influenciada por los centros comerciales aledaños, la construcción de infraestructura no se ha hecho esperar.

Para realizar una adecuada planificación urbanística es indispensable ordenar y regular adecuadamente el uso del suelo, proyectando como la lluvia efectiva que ingresa al sistema repercute en el sistema de alcan-

tarillado y en el ámbito urbano, por esto es indispensable que la empresa prestadora del servicio de acueducto y alcantarillado Veolia Aguas de Tunja S.A E.S.P elabore modelos hidrodinámicos (hidrológicos e hidráulicos) calibrados y validados con eventos de precipitación reales de toda la ciudad en especial las zonas consideradas críticas, mediante instrumentación con equipos especializados a la salida de los sectores, a través de esta investigación se pretende hacer un aporte a la ciudad y a la empresa prestadora del servicio de alcantarillado para que evalúen si deben continuar con modelos hidrodinámicos probabilísticos el método racional el cual consiste en hallar el caudal instantáneo máximo de una cuenca hidrográfica delimitada por un área preferiblemente menor a 200 ha, asume que escorrentía y precipitación son proporcionales y comparten periodos de retorno, que la precipitación es uniforme en el tiempo y en toda el área de la cuenca de estudio [12].

El estudio de los drenajes urbanos con bases experimentales in situ ayuda a la toma de decisiones más asertivas, resultados más efectivos minimizando los problemas de inundación, colmatación rebosamientos daños a las propiedades, un estudio hidrodinámico de las cuencas es la base para crear mejores estructuras.



2. METODOLOGÍA

2.1 Área de estudio

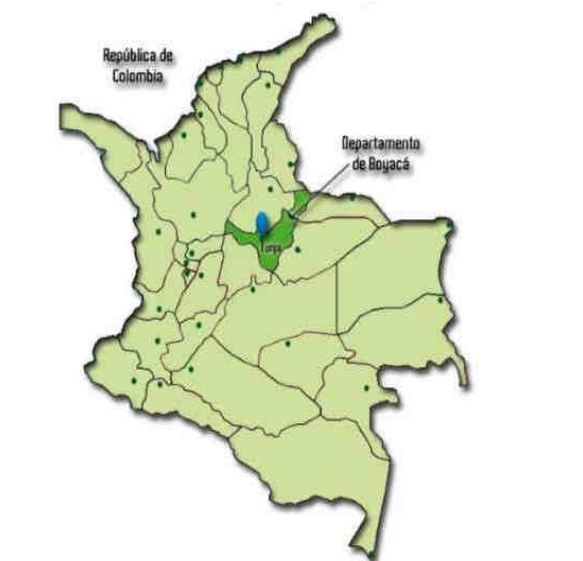
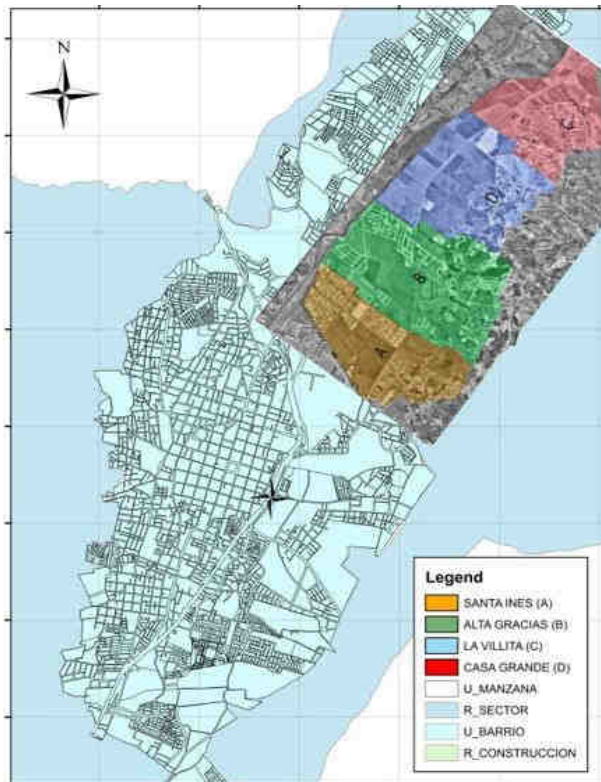


Figura 1 Localización General -Ciudad de Tunja Distritos de drenaje Zona Nororiental (Tunja- boyaca. gov.co/municipio/geografía Autores).

La ciudad de Tunja se encuentra localizada en el centro oriente de Colombia, capital del departamento ubicada en las coordenadas $5^{\circ}32'7''N$ $73^{\circ}22'04''O$ / 5.53528, -73.36778, la empresa Veolia agua de Tunja en el plan maestro de alcantarillado sectorizo la ciudad siendo la zona Nororiental dividida en cuatro distritos de drenaje así Santa Inés (A), Altagracia (B), Villita (C) y Casa Verde (D) (Ver Figura 1), esta investigación hace parte de una alianza estratégica entre la empresa VEOLIA AGUAS DE TUNJA S.A. E.S.P con la universidad Santo Tomás de Tunja a través de un convenio de cooperación en investigación el cual hace parte de un estudio macro de la zona Nororiental de la ciudad, por lo tanto, se continua con el estudio del distrito Altagracia (B).

2.2 Revisión base catastral

Con el fin de conocer el distrito y su funcionamiento hidráulico se realizó un chequeo a la topología de la red de alcantarillado, se corroboró que no presentara incongruencias o incertidumbres tales como: los registros de las cotas de cada uno de los pozos, diámetros registrados fueran distintos a los calculados, contrapendientes y doble sentido del flujo, actividad fundamental para verificar los

sentidos de flujo, operación general del sistema y finalmente se evidencio que la base catastral aportada por Veolia se ajustara a la realidad; el distrito Altagracia tiene dos descargas asociados por lo tanto se limitan a dos zonas. La totalidad de tramos o tuberías es de 459 y la cantidad de pozos es de 426.



Figura 2 Distrito Altagracia (Veolia agua de Tunja 2020, Autores).

2.3 Instalación equipo

Para ajustar a la realidad el sistema de drenaje urbano es necesario obtener los datos reales de precipitación y caudal de la zona de estudio para ello se instalaron equipos especializados, para la toma de precipitación se utilizó un pluviómetro de balancín modelo-RainLog 2.0 con datalogger - RainLogge Marca: Rainwise que almacena gran cantidades de datos y el caudalímetro Flo Dar - FL900 Series Flow Logger marca Hach el cual sigue el método de velocidad de área donde se toman las medidas para determinar a) velocidad promedio media usando el desplazamiento de fase Doppler

b) nivel a partir del cual se calcula el área humedecida a partir de una comprensión de la relación entre la profundidad y el área de la sección transversal [7] se localizó al pie de los pozos donde desembocan o desagüan al interceptor.

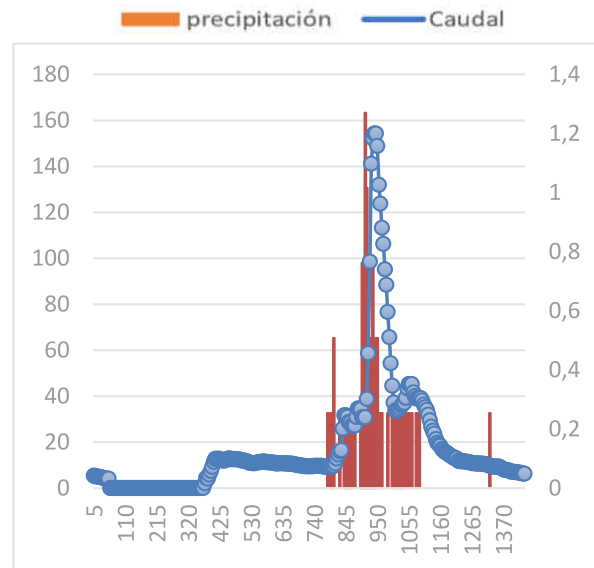


Figura 3 Hietograma e Hidrograma zona 1 Registro datos equipos (autores).

2.4 Modelo Storm Water Management Model (SWMM)

La herramienta para la gestión de aguas pluviales de la EPA que se utilizó fue Storm Management Model (SWMM 5.1) es un modelo dinámico de simulación de lluvia-escorrentía utilizado para simulación de un solo evento o de largo plazo (continua) de la cantidad y calidad de escorrentía principalmente zona urbanas. [13]

Swmm desagrega o subdivide el modelo en subcuencas que trata como un reservorio no lineal, donde la entrada es la precipitación, las salidas son infiltración evaporación y



escorrentía superficial, cuando el almacenamiento del reservorio o depósito supera su capacidad de almacenamiento se produce un encharcamiento produciendo la escorrentía superficial que no es más que el exceso de flujo que sale del depósito, cuya expresión matemática está dada por la ecuación de Manning, el programa resuelve continuamente este balance hídrico para cada subcuenca.

Para estimar el gasto a la salida de la cuenca se utiliza la ecuación (1) la cual se resuelve mediante un esquema en diferencias finitas de Newton-Raphson en cada incremento de tiempo y es una diferencial en función de la superficie de la subcuenca vista en planta (A), el ancho de la subcuenca (w) y el coeficiente de rugosidad de Manning (n).

$$\frac{dD}{dt} = i(t) - \frac{W}{An} * Yn^{5/3} * So^{1/2} \quad (1)$$

Donde Yn , la profundidad normal y se calcula $Yn = (D - Dp)$; D , la lámina de agua; Dp , el almacenamiento de retención superficial; So , la pendiente media de la subcuenca; t , el tiempo, y finalmente i es la intensidad de lluvia neta (una vez restada la evaporación y la infiltración [16])

Para el modelo de calidad del agua emplea la ecuación de conservación de masa determinando la concentración de un determinado constituyente o componente tal como DBO-5, DQO, cloruros, Ph, SST, sulfatos o sulfuros en el extremo final del conducto en determinado instante de tiempo, utiliza valores medios para las magnitudes que varían a lo largo del tiempo, tales como caudal y volumen de agua en el conducto; SWMM asume que el conducto se comporta como un reactor de tanque agitado.

Para dividir el distrito de drenaje en subcuencas o unidades hidrológicas de terreno se tuvieron en cuenta criterios de drenaje según la topografía del terreno puntos de salida o ingreso de la precipitación en el sitio, decir sumideros y se desagrega a una escala de detalle alto con 219 subcuencas, el nivel de discretización determina directamente el grado de simplificación de los datos y de concentración de los parámetros de las subcuencas. A partir de los resultados, la escala espacial influye significativamente en los resultados de la simulación con el modelo SWMM [9]

Para cada conducto se determinaron la pendiente media, longitud y área mediante el método de la bisectriz y para hallar el ancho de las subcuencas (W) en metros cuando la subcuenca se considera como un plano rectangular inclinado; se acogió la siguiente expresión:

$$W = \frac{A}{L} \quad (2)$$

Donde A es el área de la cuenca (m^2) y L es la longitud de la cuenca (m). [8]

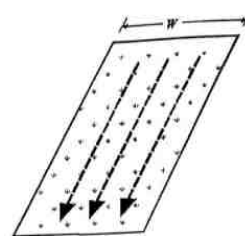


Figura 4 Ancho de Cuenca esquema en un Plano.

Si la subcuenca se idealiza como dos áreas simétricas aportantes a un conducto principal Figura 5 Ancho de Cuenca el ancho total es dos veces la longitud del conducto de drenaje [8]

$$W = 2 * L$$

(3)

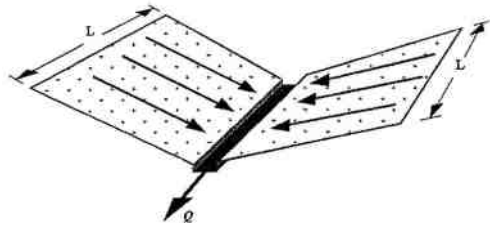


Figura 5 Ancho de Cuenca planos simétricos.

Dónde: L es la longitud media del flujo o longitud del conducto de drenaje. No obstante, las subcuencas urbanas generalmente no tienen propiedades de simetría y uniformidad. Figura 6 Ancho de Cuenca para esta condición se recurre a determinar un factor de sesgo [4] el cual se calcula de la siguiente forma:

$$S_k = \frac{(A_2 - A_1)}{A} \quad (4)$$

Siendo S_k el factor de sesgo, $0 \leq S_k \leq 1$, el área menor de un lado del conducto de drenaje, A_1 el área mayor del otro lado del conducto, y A el área total de la subcuenca. W se determina como:

$$W = \frac{(2 - S_k)}{L} \quad (5)$$

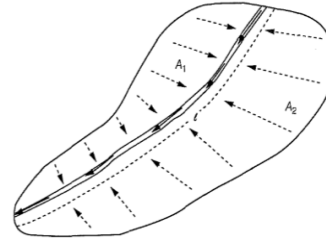


Figura 6 Ancho de Cuenca planos asimétricos.

El ajustarse a la esquematización de las subcuencas y adoptar las dimensiones reales del sistema de subcuencas representara lo mejor posible de la dinámica hídrica tal como se evidencio en la modelización hidráulica de drenaje urbano del distrito Santa Inés en un caso específico se obtuvieron similitud en la duración en el tiempo de duración de la condición real de carga en tuberías y los resultados de simulación, el modelo hidrodinámico reproduce de manera adecuada la evolución real del sistema y se empleó para realizar predicciones bajo un evento de precipitación máxima de diseño [15]

Para cada subcuenca se asignan las propiedades de las cuencas las cuales son:



Tabla 1 Propiedades de la cuencas

Nombre	Descripción
Área	Área de la cuenca (ha)
Ancho	Anchura
Pendiente (%)	Pendiente media de cuenca
Área impermeable (%)	Porcentaje cuenca cuyo suelo es impermeable
Coef n -suelo impermeable	Coef n -Manning para el flujo superficial sobre el área impermeable
Coef n-suelo permeable	Coef n -Manning para el flujo superficial sobre el área permeable
Alm.dep suelo imperm	Altura de almacenamiento en hundimiento del suelo sobre el área impermeable de la cuenca
Alm dep suelo perm	Altura de almacenamiento en hundimiento del suelo sobre el área permeable de la cuenca
% Alm Dep	Porcentaje de suelo impermeable que no presenta almacenamiento en hundimientos del suelo

Fuente: Tomado de [13]

Al realizar la revisión bibliográfica de tesis similares al presente estudio en el programa SWMM en sistemas de drenaje urbano, se observó un patrón recurrente a la hora de escoger los parámetros más sensibles o con probabilidades altas a cambios representativos, de las propiedades de las cuencas mencionada en la tabla 1 dichos propiedades son : porcentaje de área impermeable , pendiente de la cuenca y coeficiente de rugosidad de *Manning* asignado al área impermeable enunciados de mayor a menor sensibilidad [6].

En cuanto a la calidad del agua el impacto que genera los contaminantes en forma particulada (sedimentos) es mayor a largo plazo debido que tiende a acumularse y generar mayor riesgo en los cuerpos de agua al actuar como fuente secundaria de contaminantes disueltos [14]. Por tal motivo conocer las características de calidad de las agua es de suma importancia; para la zona de estudio al presentar características similares el distrito Santa Inés en cuanto a su disposición parámetros morfología de las cuencas, se hace una trasposición de los análisis de calidad de agua ya tomados en

laboratorio para el distrito santa Inés y se evaluara el comportamiento de parámetros como DBO-5, DQO, Cloruros, PH SST, Sulfatos y sulfuros con el fin de determinar si cumple con la normativa vigente.

Finalmente, como se ha mencionado la calibración es quien minimiza el grado de incertidumbre y brinda mayor exactitud al estudio siendo esto un proceso iterativo, donde los parámetros de calibración son comparados y ajustados entre los datos dados por el modelo y los observados para que tengan concordancia o similitud y así la modelación se ajuste a la realidad y se pueda simular en diferentes escenarios [5], con la validación se demuestra su fidelidad y precisión al sistema real a través de índices de eficiencia, demostrando si los modelos hidrológicos se ajustan entre los simulado y lo medido, se hace uso de criterios estadísticos de evaluación con los cuales los resultados de la calibración y la validación se cuantifican en cifras, para esta investigación se emplean los índices de eficiencia Nash- Sutcliffe, el error relativo de volumen RVE, el error cuadrático medio RMSE y el coeficiente de variación (S).

El Nash-Sutcliffe (NS) evalúa los datos de los caudales (Q) observados se asemejan a los datos simulados Donde n es el número de puntos en consideración Cuando el valor se acerca a uno (1) se puede concluir que los valores de la simulación están más cerca a los datos observados (Diana C, 2019) [1] el valor obtenido es adimensional

$$NSE = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Q_o - Q_s)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_o - \bar{Q}_o)^2} \right] \quad (6)$$

Dónde: $Q_s(i)$ y $Q_o(i)$ son el caudal simulado y observado en la descarga respectivamente

El error cuadrático medio (RMSE) (también llamado desviación cuadrática media, (RMSD) es una medida determinada de la diferencia entre los valores observados en campo y simulados por un modelo, Donde n es el número de puntos en consideración. El valor obtenido del RMSE tiene unidades

de caudal L/s o m³/s valores cercanos a 0 representan un ajuste perfecto entre los valores simulados y observados para cada intervalo de tiempo, El RMSE es la raíz cuadrada que mide la magnitud promedio del error y se obtiene de la siguiente manera (Diana C, 2019) [2]

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [Q_o(i) - Q_s(i)]^2}{n}} \quad (7)$$

Donde n es el número de puntos en consideración

el coeficiente de variación (S) es un estadístico que mide la dispersión relativa y sirve para comparar la variabilidad de diferentes grupos. El rango a evaluar es entre 0.1-2

$$S = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [Q_o(i) - Q_s(i)]^2}{n}}}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n Q_o(i)} \quad (8)$$

3. Referencias

- [1] Beltran Huertas, D. C. (2019). *Evaluación del efecto del tamaño del píxel del modelo digital de elevación en la generación de modelos lluvia escurrentía en zonas urbanas*. Bogota D.C: Universidad de la salle.
- [2] Crespo, E., & Tenelanda, D. (2014). Desarrollo de un modelo conceptual de lluvia-escurrentia para interpretacion de procesos hidrológicos de la cuenca Altoandina del río Zhurucay.
- [3] Departamento Administrativo Nacional de Estadística-DANE, Censos y Demografía. (2015). Obtenido de <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/demografia-y-poblacion/censo-nacional-de-poblacion-y-vivenda-2018>
- [4] Digiano, F., Adrian, D., & Mangarella, P. (1977). Short Course Proceedings-Applications of Stormwater Management Models. *Environmental Protection Agency*, EPA-600/2-77-065 (NTIS PB-265321).



- [5] Franklin Torres, B., Hermilo Ramírez, L., Rodríguez Cuevas, C., Tejera González, M. P., & Vásquez Jaraba, M. C. (2015). Validación de un modelo hidrodinámico y calidad del agua para el Río Magdalena, en el tramo adyacente a Barranquilla, Colombia. *Hidrobiológica*.
- [6] Guanipa Rivero, k. J., Lugo Aguilar, A., & Rincon Ortiz, J. C. (2020). Análisis de sensibilidad de parámetros hidrológicos e hidráulicos del modelo SWMM y su aplicación en sistemas de drenaje urbano. *Gaceta Técnica*.
- [7] HACH. (2018). *Guide to successful open-channel flow measurement*.
- [8] macor, J. I. (2006). *Efectos de la discretización en la simulación de escorrentía urbana*.
- [9] Martínez, M. D., Lana, X., Serra, C., Casas-Castillo, M. C., Rodríguez-Solà, R., Roca, J., . . . Biere, R. (2019). Episodios de intensidad extrema de precipitación en barcelona. Riesgo de inundaciones súbitas . *Congreso internacional ciudad y territorio*, 8315.
- [10] RainWise, Inc. (2013). *Instruction Manual RainLog™ 2.0*.
- [11] Rincón Ortíz, J. C. (2013). Diseño hidráulico de sistemas de drenaje dual a través del modelo SWMM . *Ingeniería hidráulica y ambiental*, 103-117.
- [12] Rossman, L. A. (2015). *Storma water management model user´s manual version 5.1*.
- [13] Salvador crespo, I. (2017). *Modelización del transporte de contaminantes en redes de saneamiento urbano* . España: Universidad de Huelva.
- [14] Tequia, W. E. (2019). *Modelización hidráulica de drenaje urbano. Aplicación sector nororiental distrito santa Ines Tunja Boyaca*. Tunja.
- [15] TISTALE, T., & HAMRICK, J. (1999). kinematic wave analysis of sheet flow using topography fitted coordinates. *Journal of hydrologic engineering*, 367-370.
- [16] Universidad Nacional del Litoral-Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas. (2015). *Drenaje Urbano, Diseño hidrologico en areas urbanas* . Santa Fe.



UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
PRIMER CLAUSTRO UNIVERSITARIO DE COLOMBIA
T U N J A

ACREDITACIÓN
INSTITUCIONAL
DE ALTA CALIDAD
MULTICAMPUS

Vigencia por seis años