

- **Análisis de lluvias sintéticas diarias. Metodología y aplicación.**
- **Metodología y herramientas de apoyo para realizar actividades de catastro de sistemas de alcantarillado.**
- **EciSewer: programa de uso libre para el diseño de redes de alcantarillado en perfil.**
- **Estructura escalonada con flujo rasante para realizar la entrega de un afluente a un canal realineado.**
- **Opciones para mitigar la escasez de agua potable en Colombia.**
- **La interacción de la demanda de dinero en Colombia y los bonos soberanos: 2000-2018.**

01  
Abril - junio de 2021

ISSN 0121-5132

P.V.P. Colombia \$12.000.00



## CONSEJO DIRECTIVO DE LA ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA

**PRESIDENTE** JAVIER BOTERO ÁLVAREZ

**VOCALES** GERMÁN EDUARDO ACERO RIVEROS  
GONZALO JIMÉNEZ ESCOBAR  
ARMANDO PALOMINO INFANTE  
RICARDO QUINTANA SIGHINOLFI  
RICARDO RINCÓN HERNÁNDEZ  
ROBERTO RÍOS MARTÍNEZ  
JAIRO ALBERTO ROMERO ROJAS  
GERMÁN RICARDO SANTOS GRANADOS  
JAVIER ALBERTO CHAPARRO PRECIADO  
(representante de los profesores)  
PEDRO PABLO VERGARA NEIRA  
(representante de los estudiantes)

**RECTOR** HÉCTOR ALFONSO RODRÍGUEZ DÍAZ

**SECRETARIA GENERAL** CLAUDIA JEANNETH RÍOS REYES

## REVISTA DE LA ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA

**DIRECTOR** JAIRO ALBERTO ROMERO ROJAS

**COMITÉ EDITORIAL** GERMÁN ACERO RIVEROS  
CLAUDIA JEANNETH RÍOS REYES  
PAULA XIMENA RÍOS REYES  
GERMÁN RICARDO SANTOS GRANADOS  
EDUARDO SARMIENTO PALACIO

**DIRECCIÓN EDITORIAL** CRISTINA SALAZAR PERDOMO

**EDICIÓN** **DISEÑO Y DIAGRAMACIÓN**  
JORGE CAÑAS SEPÚLVEDA  
**CORRECCIÓN DE ESTILO**  
ELKIN RIVERA GÓMEZ  
**TRADUCCIÓN Y CORRECCIÓN DE ESTILO EN INGLÉS**  
DAVID PEÑA CITA

**DIRECCIÓN COMERCIAL** EDITORIAL ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA

Versión digital disponible en <http://www.escuelaing.edu.co/revista.htm>

AUTOPISTA NORTE AK 45 # 205-59  
TEL.: (57-1) 668 3600, EXT. 533  
[revista@escuelaing.edu.co](mailto:revista@escuelaing.edu.co)  
BOGOTÁ, D.C., COLOMBIA

LA ESCUELA Y LA REVISTA NO SON RESPONSABLES DE LAS IDEAS Y CONCEPTOS EMITIDOS POR LOS AUTORES DE LOS TRABAJOS PUBLICADOS. SE AUTORIZA LA REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL DE LOS ARTÍCULOS DE LA REVISTA SI SE CITAN LA FUENTE Y EL AUTOR.

## 5 / EDITORIAL

### Errare humanum est

*Felipe Rodríguez Gómez*

## 7-15

### Análisis de lluvias sintéticas diarias. Metodología y aplicación

*Héctor Alfonso Rodríguez Díaz - Andrés Humberto Otálora Carmona*

En este artículo se presentan los análisis, cálculos, resultados y recomendaciones de la utilización de un modelo simplificado para la generación de series sintéticas diarias de lluvias en la cuenca del arroyo San Antonio, para la zona de explotación minera en el departamento del Cesar (Colombia).

## 17-20

### Metodología y herramientas de apoyo para realizar actividades de catastro de sistemas de alcantarillado

*Diego Fernando Acosta Martínez - Héctor Matamoros Rodríguez*

En Colombia, aun cuando hay manuales de buenas prácticas de ingeniería y normativa técnica en el sector de agua potable y saneamiento básico, no existen documentos que proporcionen una metodología con lineamientos y recomendaciones técnicas para la realización de catastros de sistemas de alcantarillado, lo cual ha causado sobrecostos en el desarrollo de algunas consultorías, referentes a obras de optimización o ampliación de la red existente.

## 21-27

### EciSewer: programa de uso libre para el diseño de redes de alcantarillado en perfil

*Miguel Alejandro Jiménez Barajas - Germán Ricardo Santos Granados*

Las infraestructuras de alcantarillado permiten coleccionar y transportar las aguas de las zonas pobladas a una disposición del fluido. Ya sea por la inexistencia o deficiencia de la infraestructura, se requieren herramientas para implementar o diagnosticar el servicio de alcantarillado, entre éstas programas para el diseño y modelación de redes.

## 29-35

### Estructura escalonada con flujo rasante para realizar la entrega de un afluente a un canal realineado

*Héctor Alfonso Rodríguez Díaz - Andrés Humberto Otálora Carmona*

El manejo ambiental de un proyecto de explotación minera a cielo abierto en Colombia exige el desarrollo de acciones que aseguren mantener y preservar las condiciones del medio natural. La empresa Drummond Ltd. realiza actualmente una explotación minera en el sur del departamento del Cesar, y dentro de su plan de manejo ambiental debe construir diferentes obras de ingeniería que aseguren la restauración de la cuenca, especialmente en la zona intervenida.

## 37-54

### Opciones para mitigar la escasez de agua potable en Colombia

*Luis Gabriel Angarita Torres - Jairo Alberto Romero Rojas*

En este artículo se identifican las opciones para mitigar la escasez de agua potable en Colombia. Para tal fin, en primer lugar se mencionan los municipios que ante condiciones hidrológicas promedio y condiciones hidrológicas secas cuentan con un índice de vulnerabilidad al desabastecimiento hídrico (IVH, por su sigla en inglés) que varía entre valores medio, alto y muy alto.

## **55-66**

### **La interacción de la demanda de dinero en Colombia y los bonos soberanos: 2000-2018**

*Javier Delgado - Mateo Castellanos - María Constanza Torres Tamayo - Álvaro Andrés Perdomo - Álvaro Hernando Chaves*

Se estiman los factores asociados a la demanda de dinero en Colombia desde una óptica keynesiana y se usan los rendimientos de los bonos como una proxy del costo de oportunidad. En el trabajo, además de incluir una variable que no se ha utilizado para los análisis empíricos en Colombia (rendimiento de los bonos), se hace una descomposición del costo de oportunidad a corto, mediano y largo plazo, así como una agregación de las tres.

## **67 / ALCANCE Y POLÍTICAS**

# Editorial

## Errare humanum est

**FELIPE RODRÍGUEZ GÓMEZ**

Profesor asistente del Departamento de Humanidades e Idiomas.

[felipe.rodriguez@escuelaing.edu.co](mailto:felipe.rodriguez@escuelaing.edu.co)

Para esta edición de la revista, se ponen sobre la mesa dos disciplinas que de alguna manera pueden abarcar la historia de la humanidad y que, sin embargo, siguen estando fuera del alcance de la mayoría de las personas en el planeta: el arte y la ciencia. El interés en relacionar estos dos temas no es otro que fortalecer un puente fundamental dentro de la misión de la universidad. La mirada holística planteada por la Escuela hace indispensable que los vínculos entre disciplinas se fortalezcan, y para lograr esto nada mejor que construir conversaciones desde y entre distintas disciplinas.

Se me hace provechoso, entonces, preguntarnos qué es arte y qué es ciencia, con el ánimo de salir de lugares comunes y encarnar el espíritu de estos dos términos, cuyas definiciones sugieren que hay que estar, casi por obligación, en constante transformación. Redefinirse con cada época, pensarse en cada contexto, e intentar salir de las ligerezas para responder a esta pregunta, implica dejar de usar los términos como valores morales mediocres; por ejemplo, cuando la gente dice “para mí, la ingeniería es un arte”, o “para mí, robar es una ciencia”, se adentra en un nihilismo mucho más profundo que el nihilismo cristiano. Incluso para no caer en tontadas como las de referirse a un futbolista como “el científico del gol” por llamarse Darwin, igual que el apellido del gran naturalista, geólogo y biólogo inglés, pero sin advertir ni por error la presencia de la ciencia dentro de este gran deporte. Y aunque el propósito de este editorial no es llegar a ninguna conclusión, sino

intentar extraer algunas ligerezas presentes en el lector para botarlo en el abismo que significa encontrarse con su autonomía, mi ideal sí es que este pueda transitar libremente, y quizá por primera vez, por las páginas de esta revista.

El ejercicio que constituye definir arte y ciencia no tiene otra metodología que la del experimento, la del posible fracaso, la del conocimiento, la de portar una luz, un devenir que no tiene un norte, sino una brújula, y que entiende desde su espíritu que extraviarse es, en sí mismo, encontrarse con lo desconocido. Venus. Las crisis del espíritu actuales responden en gran parte a la delimitación de la experiencia y su reducción hacia las aparentes certezas de la vida, tales como el trabajo y la sobrevivencia.

Tristemente, varios de los conocimientos científicos y artísticos que hemos adquirido en Colombia los hemos obtenido desde la memoria y el direccionamiento laboral, no desde la experiencia, es decir, no desde el pensamiento crítico. Me tomo el atrevimiento de presumir que más de uno aquí, por ejemplo, dice por memoria que la forma de la Tierra es redonda<sup>1</sup>, pero no por experiencia (*experimentum*). Si esto no es fe en la ciencia, no sé qué sea. Y de estar en lo cierto, entonces (al usar la fe para transitar por el conocimiento cientí-

1. *Redonda* tampoco sería un término preciso para definir la forma de la Tierra. Pero ilustra la oposición histórica plana vs redonda.

fico), estaríamos incurriendo en un grave error (en “un pecado”, en términos incluyentes para la media de los colombianos): el de despojar a la ciencia de su método. Sin embargo, si somos atravesados por estos dos términos, las certezas, los lugares comunes y los miedos no podrán ser nuestros aliados. Nada más pertinente que la autodeterminación, si nos definimos como una universidad de ciencia y no de teología; así mismo, si nos situamos desde y para el arte, no hay otra posición que autodeterminarnos.

Es posible que en un principio los límites entre arte, ciencia, religión, magia y medicina no estuvieran definidos como lo están ahora, pero sus propiedades fundamentales sí estaban intactas. Es plausible imaginar cómo la primera búsqueda de explicaciones a los fenómenos naturales partió del ejercicio de la imaginación, y después de horas de observación nos pareció que el trueno y el rayo respondían a la ira de un dios o a su potencia. También es posible presumir que dibujar en una pared de piedra tendría implicaciones, y representar el mundo, esto es, volver a presentar el mundo (a nuestro antojo), nos permitiría conquistar el territorio. Desde el principio quisimos entender el mundo, mas no establecer una verdad.

En la base del viaje hay a menudo un deseo de mutación existencial. Viajar es la expiación de una culpa, una iniciación, un acrecentamiento cultural, una experiencia: “La raíz indoeuropea de la palabra ‘experiencia’ es *per*, que ha sido interpretada como ‘intentar’, ‘poner a prueba’, ‘arriesgar’, unas connotaciones que persisten en la palabra *peligro*. Las connotaciones demostrativas más antiguas de *per* aparecen en los términos latinos que aluden a la experiencia: *experiror*, *experimentum*. Esta concepción de la experiencia en tanto que cimiento, en tanto que paso a través de una forma de acción que mide las verdaderas dimensiones y la verdadera naturaleza de la persona o del objeto que lo emprende, describe también la concepción más antigua de los efectos del viaje sobre el viajero. Muchos de los significados secundarios de *per* se refieren específicamente al movimiento: ‘atravesar un espacio’, ‘alcanzar un objetivo’, ‘ir hacia afuera’. La implicación del riesgo, presente en la palabra *peligro*, resulta evidente en las palabras góticas afines a *per* (en las cuales la *p* se convierte en una *f*): *ferm* (‘hacer’), *fare* (‘ir’), *fear* (‘temer’), *ferry* (‘cruzar un río en barco’).

Una de las palabras alemanas que significan ‘experiencia’, *erfahrung*, proviene del alto alemán antiguo, *irfaran*: ‘viajar’, ‘salir’, ‘atravesar’ o ‘vagar’. La idea profundamente arraigada según la cual el viaje es una experiencia que pone a prueba y perfecciona el carácter del viajero aparece claramente en el adjetivo alemán *bewandert*, que actualmente significa ‘sagaz’, ‘experto’ o ‘versado’, pero que originalmente (en los textos del siglo XV) se limitaba a cualificar a quienes habían ‘viajado mucho’” (Erich J. Leed [1991]. *The mind of the traveller. From Gilgamesh to global tourism*. Nueva York: Basic Books.

Lo poco versados que somos hoy en día, nuestra falta de experiencia vital, nos ha llevado incluso a malinterpretar a Darwin, como lo hicieron los nazis (antes el capitalismo), y a reducirlo a un mezquino darwinismo social. Es la “atroz” interpretación huxleyana, la cual (me atrevería a decir) ha atravesado a más de uno de los lectores de esta revista, sin darse cuenta, debido a su pasividad.

Otro ejemplo consiste en establecer el modelo económico actual como el único posible, con sofismas, como enunciar que otros modelos pasados funcionaban aún menos; el odio a estos otros modelos también caducos nos impide intentar proponer algo nuevo y nos lleva a estancarnos en la certeza de las cosas que no funcionan y no pueden cambiar. Pero ¿qué es la vida si no un constante cambio? Tal vez deberíamos revisar las definiciones actuales de *arte* y de *ciencia* y evaluar de cuándo datan.

En la modernidad se establecen definiciones para estas dos palabras, con un impacto tan profundo que incluso persisten hoy en día en la conciencia de la mayoría de las personas. Podemos decir que la obsesión de la modernidad por la verdad, por lo verdadero y lo falso, nos llevó al decrecimiento del pensamiento crítico, que contradictoriamente era una búsqueda de la objetividad por medio de la exaltación de las subjetividades. La irracional búsqueda de la razón, relegar el poder en estas subjetividades, nos llevó a una suerte de fe ciega en la ciencia, a una dependencia, nos volvimos débiles, dejamos de hacernos preguntas.

¿Qué son el arte y la ciencia? ¿No son acaso la misma vitalidad? Sobre el lector recae la responsabilidad de transformar el mundo. Leer no es una actitud pasiva, sino todo lo contrario. Leer es viajar. Es peligro. Es experimento.

# Análisis de lluvias sintéticas diarias. Metodología y aplicación

## Analysis of daily synthetic rain series. Methodology and application

HÉCTOR ALFONSO RODRÍGUEZ DÍAZ<sup>1</sup> - ANDRÉS HUMBERTO OTÁLORA CARMONA<sup>2</sup>

1. Profesor titular de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Bogotá, D.C., Colombia.

2. Profesor asistente de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Bogotá, D.C., Colombia.

alfonso.rodriguez@escuelaing.edu.co - andres.otalora@escuelaing.edu.co

Recibido: 10/10/2020 Aceptado: 05/01/2021

Disponible en [http://www.escuelaing.edu.co/es/publicaciones\\_revista](http://www.escuelaing.edu.co/es/publicaciones_revista)  
<http://revistas.escuelaing.edu.co/index.php/reci>

### Resumen

En este artículo se presentan los análisis, cálculos, resultados y recomendaciones de la utilización de un modelo simplificado para la generación de series sintéticas diarias de lluvias en la cuenca del arroyo San Antonio, para la zona de explotación minera en el departamento del Cesar (Colombia). Se ha usado como base un método de reanálisis de datos diarios de la Universidad de Chile (2015), método que se ha optimizado teniendo en cuenta las particularidades hidrológicas de la zona de estudio, con el propósito de reducir las diferencias entre el patrón generado por la lluvia sintética y el patrón de los registros históricos originales. Estos métodos de generación reproducen secuencias de las magnitudes de tales variables, resguardando las características de la serie histórica.

El propósito de la generación de estos datos sintéticos es la reproducción de valores con patrones particulares para hacer análisis hidrológicos, tomando dichas series como registros reales de lluvias futuras.

**Palabras claves:** lluvia sintética, precipitación diaria, patrón de precipitación.

### Abstract

This article presents the analysis, calculations, results, and recommendations of the use of a simplified model for the generation of synthetic rain series in the San Antonio stream basin, for the exploitation area in the department of Cesar (Colombia). In this analysis, the reanalysis method developed by the University of Chile (2015) was used as a basis. Given the hydrological particularities of the study area and with the purpose of reducing the differences between the pattern generated by synthetic rain and the pattern of historical series, the method has been optimized. These generation methods reproduce the sequences of the variables of various variables, safeguarding the characteristics of the historical series. The aim of the generation of these synthetic data is the reproduction of values with particular patterns to perform hydrological analyzes, using these series as real rainfall records.

**Keywords:** synthetic rain, daily precipitation, precipitation pattern.

## INTRODUCCIÓN

En este artículo se describen de manera general los análisis hechos para la generación de lluvias sintéticas en cuencas hidrográficas del sur del departamento del Cesar (Colombia) a partir de registros diarios, tomando como referencia un método de reanálisis de datos diarios propuesto en un estudio de la Universidad de Chile (2015). Este método se ha optimizado teniendo en cuenta las particularidades hidrológicas de la zona de estudio, con el propósito de reducir las diferencias entre el patrón generado por la lluvia sintética y el patrón de los registros históricos originales.

En general, los métodos estocásticos para la generación de datos diarios utilizan series históricas, las cuales constituyen una muestra estadística de la variable hidrológica que se va a reproducir. Dichos métodos de generación reproducen secuencias de las magnitudes de tales variables, resguardando las características de la serie histórica que les dio origen, sin que los valores o secuencias de estos sean iguales a los observados. El propósito de la generación de tales registros sintéticos es la reproducción de datos con patrones particulares que permitan hacer análisis hidrológicos, asumiendo estas series como registros reales de lluvias futuras.

Para emplear esta metodología se requiere disponer de series de datos diarios y con una extensión anual (365 días). Debido a la incertidumbre en la generación de datos aleatorios determinísticos, en este trabajo se han propuesto tres opciones de generación de lluvias sintéticas diarias.

La primera opción de generación sintética se realiza tomando los datos diarios de un año, representativos

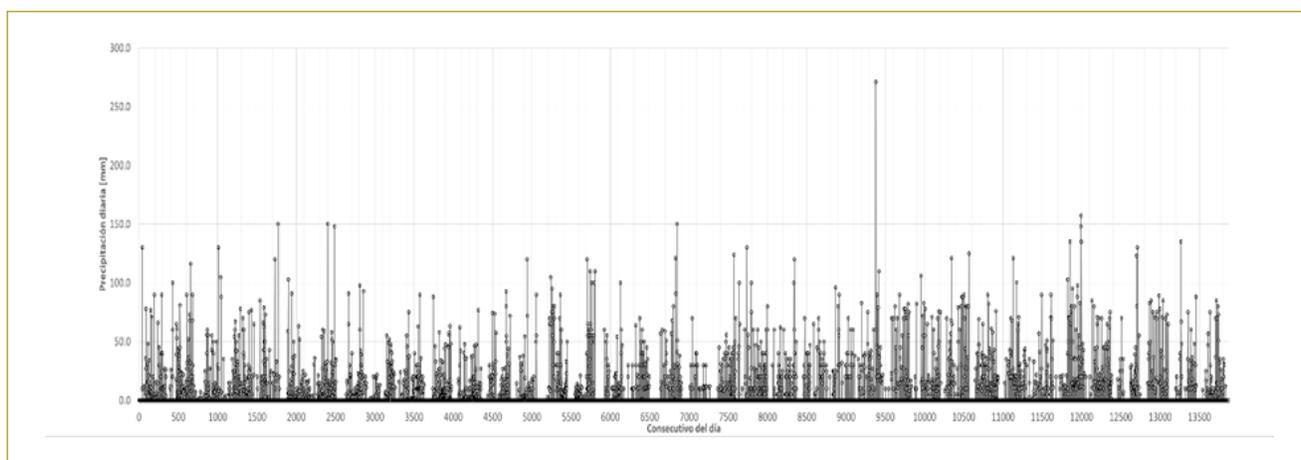
para la estación; en este caso, se usa una serie con 365 datos, conformada con los valores de la precipitación media diaria multianual, obtenida con el promedio diario de los datos del número de años disponibles. Establecida esta serie base, se pueden obtener tantas series como procesos se efectúen.

La segunda opción de generación sintética se realiza utilizando los 365 datos de cada uno de los años de registro. Por tal razón, por cada serie anual de registros se puede obtener una serie sintética que mantiene el patrón de la serie original, pero no necesariamente su media y su desviación.

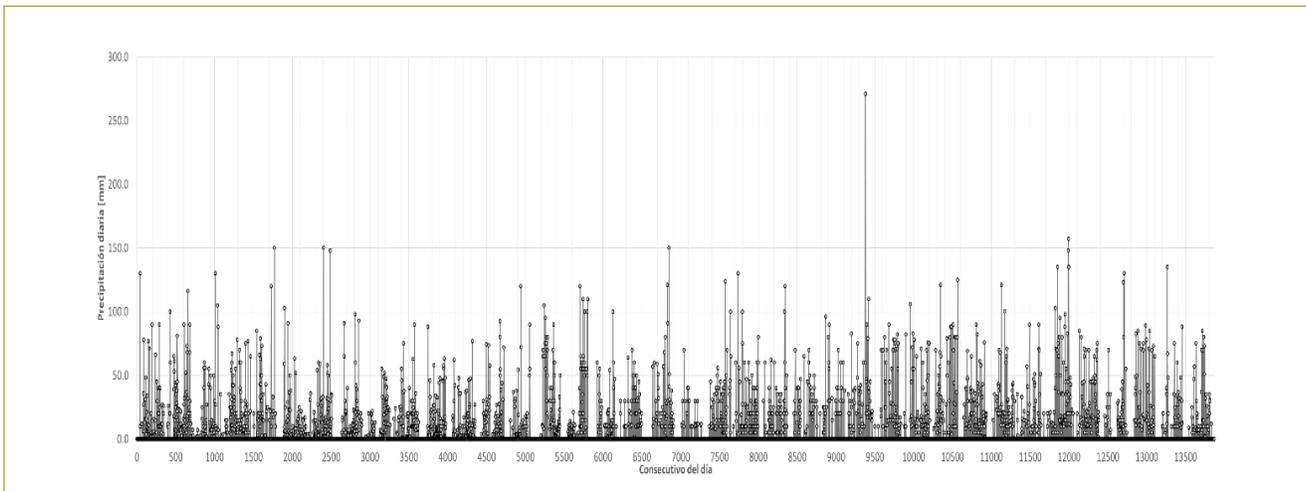
Finalmente, en la tercera opción se aplica el mismo procedimiento de la segunda, pero haciendo un proceso de depuración y optimización tal, que cada año sintético tenga una media y una desviación similar a los valores de la serie original.

## RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN HIDROCLIMATOLÓGICA

Para disponer de la información hidroclimatológica de la zona de estudio, se procedió a adquirir y revisar, para la zona de estudio, los datos de estaciones climatológicas especiales, ordinarias, pluviométricas y pluviográficas del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam). Se seleccionaron todas aquellas estaciones con años de registro suficientemente extensos. En total, se obtuvieron 27 estaciones con datos diarios de precipitación, para todo el periodo de registro seleccionado. A continuación se muestran los datos diarios de precipitación de las dos estaciones más representativas de la zona (figuras 1 y 2).



**Figura 1.** Registros diarios de precipitación, periodo 1963 a 2010. Estación La Loma, serie natural.



**Figura 2.** Registros diarios de precipitación, periodo 1963 a 2010. Estación La Jagua, serie natural.

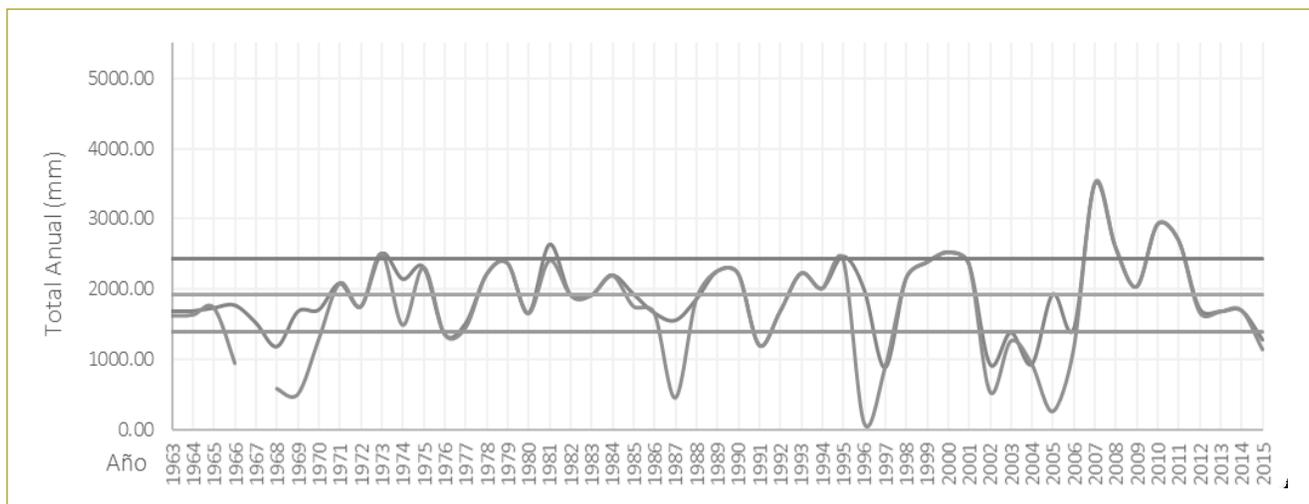
### EXTENSIÓN DE LAS SERIES Y DATOS COMPLETADOS

Después de la depuración inicial de la información pluviométrica obtenida, se procedió a homogeneizar las series, así como a completar y extender los datos diarios de precipitación en las estaciones seleccionadas. Dicho análisis se hizo a partir de estaciones base, con datos suficientemente largos y homogéneos que permitieron completar los datos faltantes o erróneos de las demás estaciones. Para realizar este procedimiento, se trató de mantener el promedio de las series y de conservar la tendencia de los datos diarios de precipitación. A manera de ejemplo, se presentan los resultados de los registros extendidos y completados de la estación denominada La Jagua, a partir de los registros de la estación base (figura 3).

### DESCRIPCIÓN GENERAL DEL MODELO SIMPLIFICADO DE GENERACIÓN DE LLUVIA SINTÉTICA

Tal como se mencionó, para la generación de la precipitación diaria se seleccionó el método de reanálisis de datos, propuesto en un estudio de la Universidad de Chile (2015) a partir de la generación de datos diarios, con base en las estadísticas de los valores mensuales de la serie observada (para la extensión anual), manteniendo su media y su desviación.

En este método se usa el concepto de la persistencia hidrológica, el cual define la probabilidad de que en dos o más días consecutivos húmedos exista una alta probabilidad de presentarse un tercer día húmedo y viceversa con los días secos. Dicha metodología presenta una ventaja significativa, ya que trunca los valores negativos;



**Figura 3.** Comparación del ciclo anual de datos diarios de precipitación. Estación base y estación La Jagua.

para la generación de los parámetros aleatorios, utiliza la función gamma y la función normal, las cuales se pueden acotar a valores mayores que cero.

En razón de la magnitud de la información que se produce, y con el propósito de disminuir el tiempo de cómputo, se desarrolló un *software* simple en Wolfram Mathematica, el cual permite generar datos a partir de la metodología descrita y para una serie anual de registros. Se encuentra un resultado óptimo, disminuyendo el error entre los parámetros estadísticos de la serie histórica con respecto a la serie sintética.

### METODOLOGÍA DE CÁLCULO DE LA LLUVIA SINTÉTICA

A continuación se expone la base teórica de la metodología empleada para la generación de la lluvia sintética a diario, utilizando los conceptos estadísticos y determinísticos de los modelos estocásticos.

En este método, se definen inicialmente como días húmedos (H) o secos (S) cada uno de los 365 datos de precipitación de la serie anual. Un día se define como húmedo si durante el transcurso del día las lluvias acumuladas superan o igualan 0,1 mm; de lo contrario, se clasificará como un día seco. También es necesario comparar la información de dos días consecutivos, determinando las posibles combinaciones de días secos y húmedos. Hay que nombrar cada pareja de datos según la siguiente clasificación: húmedo-húmedo (HH), seco-seco (SS), húmedo-seco (HS), seco-húmedo (SH).

Adicionalmente, se requiere calcular los parámetros estadísticos mensuales de la serie histórica (media y desviación estándar) y la probabilidad de ocurrencia de la combinación de días húmedos-secos, denominados PHS, y la probabilidad de ocurrencia de la combinación de días húmedos-húmedos, llamados PHH. Las expresiones que definen estas probabilidades son:

$$PHS = \frac{NHS}{NS} \quad (1)$$

$$PHH = \frac{NHH}{NH} \quad (2)$$

Donde:

NHS: número de combinaciones de días húmedos-secos  $i$ .

NH: número de combinaciones de días húmedos-húmedos  $i$ .

NS: número de días secos en el mes  $i$ .

NH: número de días húmedos en el mes  $i$ .

Estas dos probabilidades discretas permiten crear la serie sintética a partir de las funciones probabilísticas continuas gamma y normal.

Antes de aplicar las funciones de probabilidades, es necesario crear una lista de números aleatorios entre cero (0) y uno (1), cuya tendencia responda a la distribución normal. Este procedimiento es relativamente sencillo de hacer, debido a la implementación de funciones ya incorporadas en el *software* y en las hojas de cálculo. Cabe anotar que el *software* que se ha desarrollado en Wolfram Mathematica varía y delimita el rango de los números aleatorios, manteniendo su tendencia normal de un modo tal que, al generar la serie sintética, esta posea el menor error con respecto a la serie histórica.

Después de la generación de los números aleatorios con distribución normal, se procede a nombrar como día húmedo (H) o seco (S) los números aleatorios generados a partir de la media y desviación de la serie histórica. Esto se realiza al comparar la magnitud de dichos datos con la probabilidad de ocurrencia de la combinación de días HS y HH, PHS y PHH, respectivamente, de la siguiente manera:

$$\text{Si } x_{i-1} = S \text{ y números aleatorios} > PHS, \text{ entonces } x_i = S \quad (3)$$

$$\text{Si } x_{i-1} = S \text{ y números aleatorios} > PHS, \text{ entonces } x_i = H \quad (4)$$

$$\text{Si } x_{i-1} = H \text{ y números aleatorios} > PHH, \text{ entonces } x_i = S \quad (5)$$

$$\text{Si } x_{i-1} = H \text{ y números aleatorios} > PHH, \text{ entonces } x_i = H \quad (8)$$

El primer valor aleatorio generado (valor semilla) debe poseer un nombre (H o S) a criterio del investigador, ya que será el valor semilla del cálculo. Al tener etiquetados todos los valores aleatorios con "H" o "S", es posible utilizar la función inversa de gamma para determinar la lluvia sintética diaria, así:

$$\text{Si } x_i = S, \text{ entonces } P_i = 0 \quad (7)$$

$$\text{Si } x_i = S, \text{ entonces}$$

$$P_i = \text{Inversa de la función gamma para el mes } i \quad (8)$$

Donde:

$P_i$ : lluvia sintética para el mes  $i$ .

La función gamma es una función continua que depende de la probabilidad de ocurrencia de un evento  $X$  y de los parámetros alfa ( $\alpha$ ) y beta ( $\beta$ ). Por tanto, el valor de la probabilidad que va de cero (0) a uno (1) es el dato aleatorio determinado anteriormente. Además, se tiene que:

$$\alpha_i = \left( \frac{\bar{x}_i}{\sigma_i} \right)^2 \quad (9)$$

$$\beta_i = \frac{\sigma_i^2}{\bar{x}_i} \quad (10)$$

Donde:

$\alpha_i$ : parámetro alfa para el mes  $i$ .

$\beta_i$ : parámetro beta para el mes  $i$ .

$\bar{x}_i$ : promedio de los datos diarios del mes  $i$ .

$\sigma_i$ : desviación estándar muestral de los datos diarios del mes  $i$ .

Con el propósito de revisar las opciones y evaluar su comportamiento, se generaron series sintéticas con los registros diarios de precipitación de las estaciones La Jagua y La Loma. Tal como se mencionó anteriormente, se evaluarán dos opciones de generación. Para la primera se utilizará una serie representativa obtenida con los valores medios diarios multianuales. La segunda opción consiste en generar una serie sintética de valores diarios por cada año de registro.

A renglón seguido se presenta, a manera de ejemplo, una comparación entre los resultados obtenidos para la

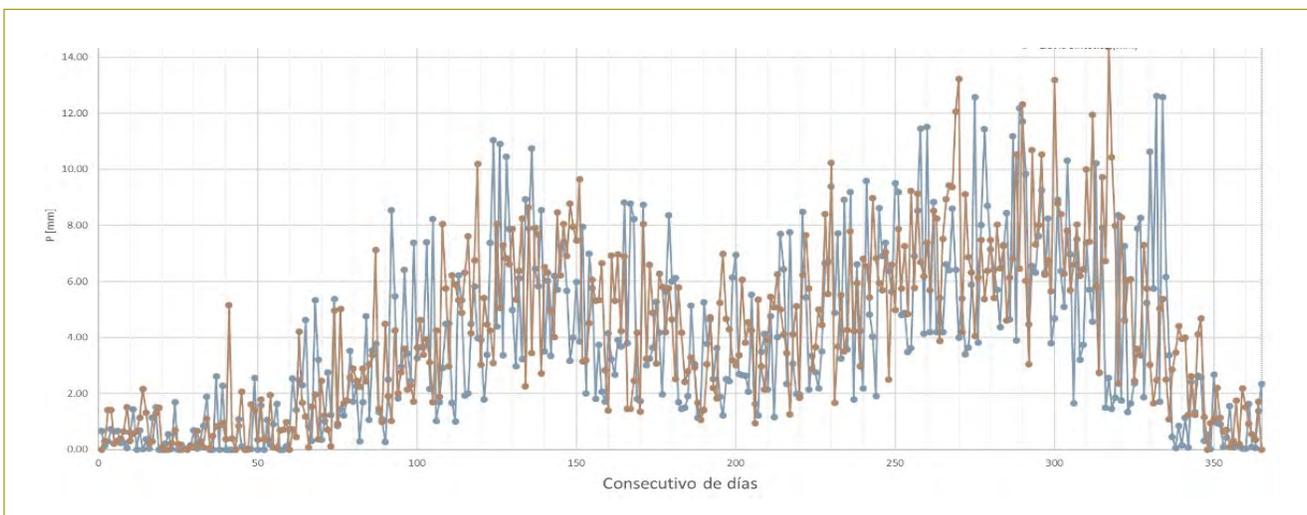
primera opción de la serie sintética generada a diario y los datos observados.

En la figura siguiente se presentan los resultados para una serie sintética de valores diarios (365 datos), de las muchas que se generaron en la estación La Loma. Esta serie sintética se obtuvo de acuerdo con lo establecido con la primera opción, es decir, la base es una serie histórica conformada con los promedios diarios multianuales para cada uno de los 365 datos del año. Tal como se puede ver (figura 4), los valores diarios no necesariamente conservan el mismo patrón de la lluvia base, pero la lluvia producida conserva las propiedades estadísticas anuales de los datos históricos.

### RESULTADOS DE LAS SERIES SINTÉTICAS GENERADAS CON LA PRIMERA OPCIÓN

En esta primera opción, a partir de los 50 años de registros diarios de precipitación disponibles en cada una de las estaciones estudiadas en la zona, se procedió a conformar una serie de 365 datos representativos para cada una de ellas. Cada dato se obtiene con el promedio diario multianual de los registros de cada estación.

Conformada esta serie, se procedió a aplicar la metodología de generación de lluvia sintética con el método de reanálisis descrito anteriormente, seleccionando las series cuyos parámetros estadísticos mensuales (media y desviación) tuvieran la menor diferencia entre la serie generada y la serie usada para su generación. Este procedimiento de selección se hizo con ayuda de los *softwares*



**Figura 4.** Comparación de los registros históricos multianuales de la estación La Loma y una serie diaria sintética.

Wolfram Mathematica y Microsoft Excel al crear una secuencia de trabajo en paralelo, cuyo propósito es determinar la mejor serie después de 50 simulaciones por cada año de modelación.

Más adelante, se muestran las series de precipitación sintética producidas con una extensión de 50 años, generadas con la primera opción, a partir de los registros históricos de precipitación diaria multianual de las estaciones La Loma y La Jagua; es decir, mediante el empleo de la serie multianual se han generado aleatoriamente 50 años de series diarias (cada serie con 365 registros por año). Tal como se puede ver, la precipitación presenta un comportamiento cíclico anual, debido a que el proceso realizado mantiene la tendencia de los datos originales (valores medios multianuales). La media y la desviación son muy similares a los datos de la serie base diaria a nivel multianual.

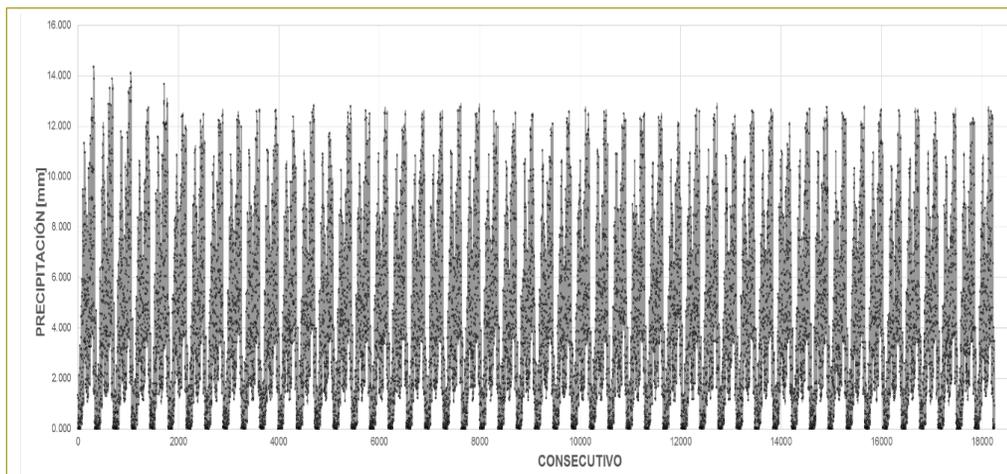
Adicionalmente, se observa que los valores extremos de precipitación son atenuados debido a que se utilizó el promedio de cada uno de los días de la serie, sesgando los valores extremos (figuras 5 y 6).

Como resultado de este procedimiento de generación, se puede concluir que al utilizar esta serie de datos sintéticos para realizar una modelación lluvia - escorrentía se podrían subvalorar las precipitaciones específicas y, a su vez, la escorrentía superficial.

## RESULTADOS DE LAS SERIES SINTÉTICAS GENERADAS CON LA SEGUNDA OPCIÓN

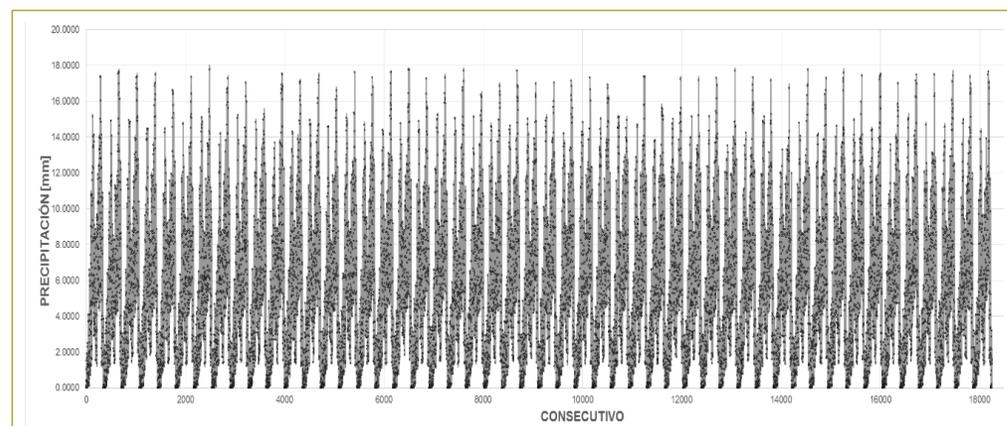
A partir de los resultados de la primera opción de generación de la lluvia sintética diaria, y teniendo en cuenta el comportamiento de los registros de precipitación de la zona, se puede concluir que una serie sintética producida a partir de una sola serie base (promedio multianual de cada registro) no resulta recomendable debido a la atenuación de las lluvias máximas diarias. Por esta razón, se concibió una segunda opción para la generación de lluvias diarias.

En la segunda opción de generación de series sintéticas de precipitación diaria se emplea cada año de



**Figura 5.** Lluvia sintética de 50 años generada a partir de la media multianual de los valores diarios de la serie histórica. Estación La Loma.

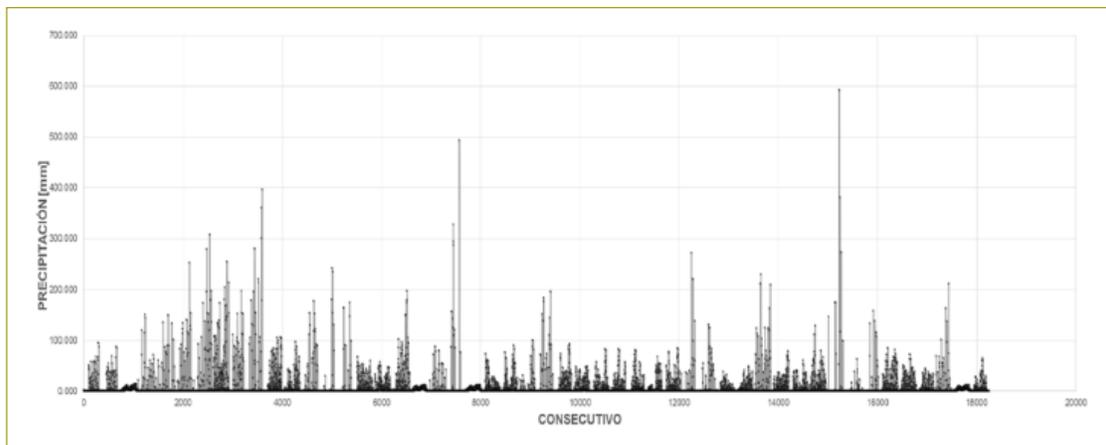
**Figura 6.** Lluvia sintética de 50 años generada a partir de la media multianual de los valores diarios de la serie histórica. Estación La Jagua.



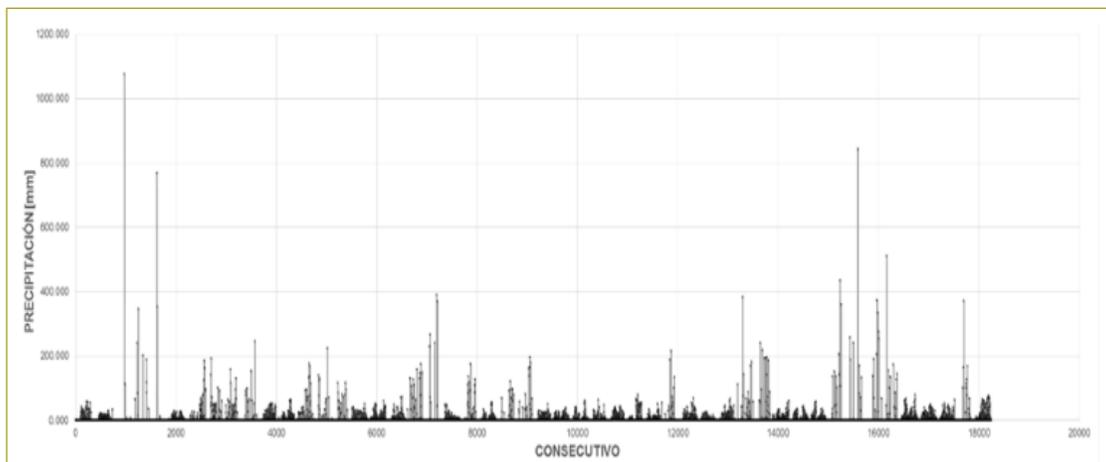
registro para generar un año sintético; esto significa que por cada año de registro (365 datos) se generará un año sintético (365 datos), manteniendo la media y la desviación estándar de la serie base de cada año.

Con el propósito de analizar la sensibilidad de los datos generados con esta opción, se han realizado dos procedimientos por cada serie generada. Para el primer procedimiento de esta segunda opción se han generado registros sintéticos cuyo promedio en general resulta superior al promedio de los registros históricos. En el segundo procedimiento de esta segunda opción se han definido un límite máximo y un límite mínimo para los datos generados, con el fin de que la serie sintética generada tenga un promedio similar al promedio de los registros históricos a diario. Se observa que, en este caso, la serie sintética generada mantiene el mismo patrón diario de la serie base.

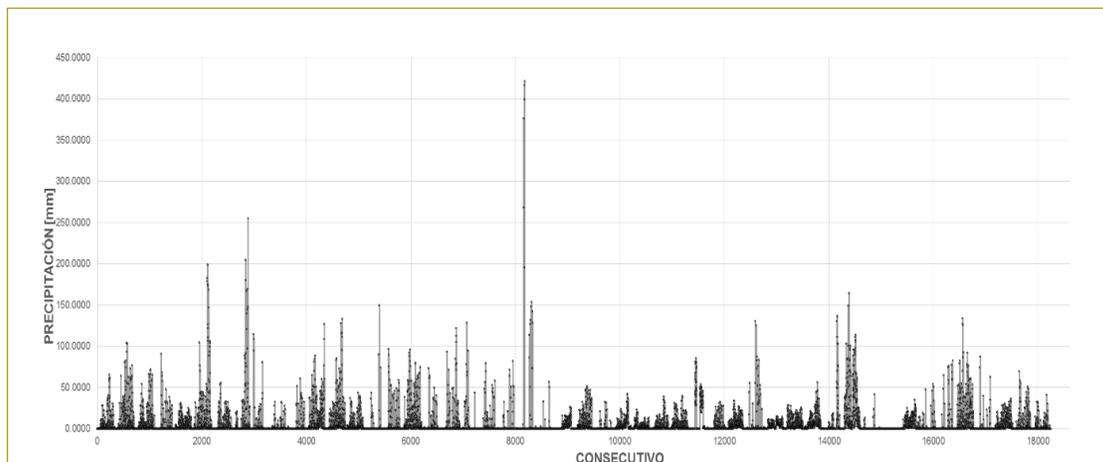
Estas modelaciones con la opción dos permiten analizar la variabilidad de la lluvia diaria, al recrear distintas condiciones sin alterar las características estadísticas de la serie histórica. Cabe destacar que es posible generar tantas series como el usuario desee, manteniendo la tendencia de la media, pero modificando la desviación estándar de los registros sintéticos. Adicionalmente, es posible generar distintas tendencias de la precipitación al reagrupar en forma aleatoria las series sintéticas obtenidas, lo que permite generar un número casi infinito de series, manteniendo entre estas exactamente la misma media y la misma desviación estándar. A continuación se presentan los resultados de ambas modelaciones para la estación La Loma (figuras 7 y 8) y posteriormente se muestran los resultados para la estación La Jagua (figuras 9 y 10).



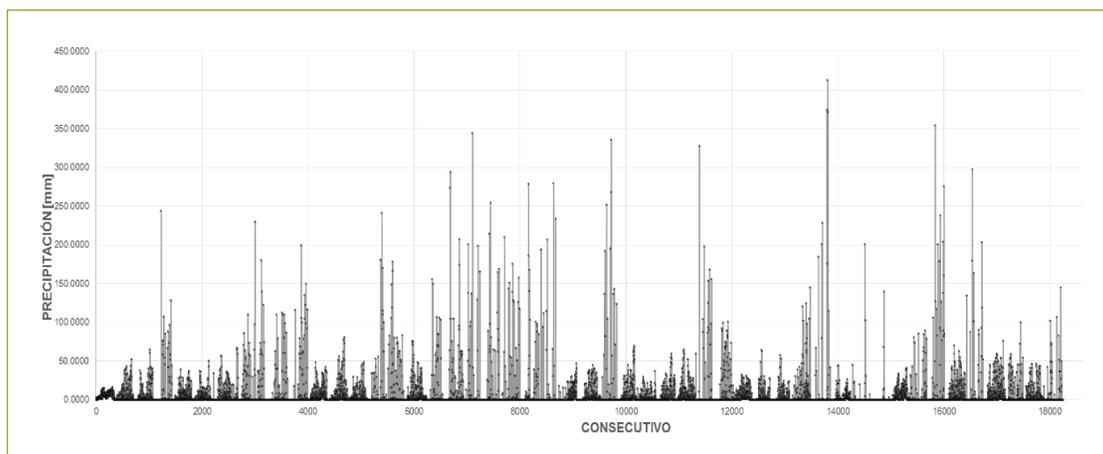
**Figura 7.** Lluvia sintética obtenida año tras año, manteniendo los valores medios anuales de la serie natural. Estación La Loma (modelación 1, opción 2).



**Figura 8.** Lluvia sintética obtenida año tras año, manteniendo los valores medios anuales de la serie natural. Estación La Loma (modelación 2, opción 2).



**Figura 9.** Lluvia sintética obtenida año tras año, manteniendo los valores medios anuales de la serie natural. Estación La Jagua (modelación 1, opción 2).



**Figura 10.** Lluvia sintética obtenida año tras año, manteniendo los valores medios anuales de la serie natural. Estación La Jagua (modelación 1, opción 2).

Al observar los gráficos de las dos opciones propuestas, se aprecia la diferencia en la magnitud de los registros diarios, lo que sugiere que con una serie de registros históricos es posible generar tantas series sintéticas muy diferentes como parámetros estadísticos se definan para la serie original. Estas propiedades determinísticas y aleatorias del modelo se pueden emplear para crear distintos escenarios de un mismo evento de lluvia, con magnitudes similares distribuidas en el tiempo para una banda aceptable de resultados, las cuales a su vez se pueden usar para simular eventos extremos en una misma cuenca, creando una envolvente de resultados de escorrentía y de más variables hidrológicas que dependen de la precipitación. Lo importante es seleccionar los eventos sintéticos que reproduzcan adecuadamente en el tiempo la serie original.

Además de la variabilidad de los resultados de las series generadas, existe una gran influencia en los resultados, al seleccionar la serie base utilizada para la generación de los datos sintéticos. Por ejemplo, es posible generar un dato sintético por cada registro histórico o generar  $n$  datos sintéticos con una serie representativa, que el usuario puede obtener y seleccionar.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El modelo empleado permite generar series sintéticas de registros diarios a partir de los parámetros estadísticos de la serie histórica. Dependiendo de cómo se genere la serie sintética, se pueden atenuar los picos de la serie histórica si se adopta como serie base el promedio multianual de todos los valores diarios de los registros históricos.

De acuerdo con las simulaciones y los análisis hechos, si se desean mantener los valores máximos de la serie histórica, lo adecuado es generar series sintéticas utilizando cada año de la serie histórica, así se presenten variaciones de la desviación estándar.

Es necesario revisar los parámetros estadísticos de los datos sintéticos generados. Cuando en la serie histórica se tienen valores extremos, los parámetros estadísticos pueden resultar significativamente diferentes de los parámetros de la serie sintética.

El valor límite definido en el modelo para establecer la frontera entre un día seco y un día húmedo puede tomar un valor que se puede establecer con base en la secuencia de mínimos. Este parámetro podría modificarse, dependiendo de las características del ciclo hidrológico de la zona de estudio.

Con base en los análisis efectuados en la zona de estudio, es posible concluir que toda serie sintética de precipitación diaria se puede modificar, dependiendo de las características hidroclimatológicas particulares.

## REFERENCIAS

- Olave Cuadra, P. E. & Vargas Mesa, X. (2015). *Generación de montos diarios de precipitación a partir de series observadas, rellenadas con datos de reanálisis* (tesis de pregrado, Universidad de Chile, Santiago de Chile, Chile).
- Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito (2018). *Caracterización del área de influencia (componente hidrología e hidráulica) requerida para la modificación de la licencia ambiental del proyecto La Loma para el periodo 2019-2048*. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, Centro de Estudios Hidráulicos.
- Francés, F., García Bartual, R. et al. (2010). *Diseño hidrológico de alto periodo de retorno mediante generación sintética de eventos* (tesis de pregrado, Instituto de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente [IIAMA], Valencia, España).
- García Gutiérrez, F. P. (2010). *Modelación hidrológica estocástica: desarrollo de un modelo de generación sintética de series temporales*. Santa Cruz, Bolivia: Universidad Autónoma Gabriel René Moreno.
- Universidad Politécnica de Cataluña-Grupo de Hidrología Subterránea (UPC-GHS) (2009). *Generación de series futuras de precipitación y temperatura*. Barcelona: Universidad Politécnica de Cataluña.
- Yevchevich, V. (1972). *Stochastic processes in hydrology*. Fort Collins, Colorado, USA: Water Resource Publications.



# Metodología y herramientas de apoyo para realizar actividades de catastro de sistemas de alcantarillado

## Methodology and support tools to perform registry activities of sewage systems

**DIEGO FERNANDO ACOSTA MARTÍNEZ<sup>1</sup> - HÉCTOR MATAMOROS RODRÍGUEZ<sup>2</sup>**

1. Especialista en Recursos Hidráulicos y Medio Ambiente.

2. Ingeniero Civil, Especialista en Recursos Hidráulicos y Medio Ambiente y Magister en Ingeniería Civil de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

diego.acosta-m@mail.escuelaing.edu.co - hector.matamoros@escuelaing.edu.co

Recibido: 11/12/2020 Aceptado: 08/01/2021

Disponible en [http://www.escuelaing.edu.co/es/publicaciones\\_revista](http://www.escuelaing.edu.co/es/publicaciones_revista)  
<http://revistas.escuelaing.edu.co/index.php/reci>

### Resumen

En Colombia, aun cuando hay manuales de buenas prácticas de ingeniería y normativa técnica en el sector de agua potable y saneamiento básico, no existen documentos que proporcionen una metodología con lineamientos y recomendaciones técnicas para la realización de catastros de sistemas de alcantarillado, lo cual ha causado sobrecostos en el desarrollo de algunas consultorías, referentes a obras de optimización o ampliación de la red existente. Dichos sobrecostos se asocian a reprocesos que se deben ejecutar para complementar o solucionar errores en la información levantada en campo.

Al no contar con un catastro de alcantarillado actualizado y con información veraz, el municipio que quiera desarrollar obras de optimización o ampliación de la red existente, o tenga la necesidad de hacerlo, está obligado a destinar un recurso importante en la identificación de estructuras, así como en el levantamiento de la información física y funcional de cada componente de la red; en cambio, en los municipios donde haya un pleno control de la información de la red de alcantarillado, se tienen ventajas en las etapas de diagnóstico y planeación de obras de optimización y expansión.

En este artículo se presenta una recopilación de información, tomando los resultados del análisis de parámetros y requerimientos de las principales empresas prestadoras de servicio de alcantarillado en Colombia, y se recogen algunas experiencias de profesionales de la ingeniería dedicados a hacer trabajos de consultoría. Dicha recopilación de información se presenta como estado del arte y como un conjunto de requerimientos para efectuar los trabajos de catastro, con el objetivo de priorizar los esfuerzos en la ejecución de ciertas actividades claves para llegar a realizar un catastro de alcantarillado de una manera eficiente y eficaz, con resultados veraces.

Luego de haber determinado las actividades claves y sus requerimientos para los catastros, se propone una metodología y se considera el uso potencial de herramientas computacionales, incluyendo el diseño de una aplicación, la cual no solo apoyará el desarrollo de los trabajos de campo en la captura y almacenamiento de información estructurada, sino que también se puede descargar para hacer el posproceso en oficina. Por último, la metodología propuesta y la herramienta concebida se aplican a un estudio de caso, con miras a establecer una comparación y determinar posibles ventajas en el desarrollo de los trabajos de catastro.

En este artículo se dan algunas recomendaciones sobre el levantamiento de catastro de alcantarillado, desde acciones procedimentales, trabajo en campo, marcaje de los componentes del sistema, hasta la forma adecuada de tomar el registro fotográfico. Además, se destacan las ventajas de conformar un sistema de información geográfica del sistema objeto del estudio, creado a partir de la base de datos relacionada que se obtiene de los reportes de la *app* desarrollada.

**Palabras claves:** sistema de alcantarillado, catastro de alcantarillado, inventario de estructuras

#### Abstract

In Colombia, even when there are manuals of good engineering practices and technical regulations in the drinking water and basic sanitation sector, there are no documents that provide a methodology with guidelines and technical recommendations for carrying out registries for sewerage systems, which has caused cost overruns in the development of some consultancies related to optimization works and/or expansion of the existing network. Such cost overruns are associated with reprocesses that must be executed to complement or solve errors in the information collected in the field.

By not having an up-to-date sewerage registry with accurate information, the municipality that wants or has the need to carry out works to optimize and/or expand the existing network is forced to allocate significant resources for identifying structures and the survey of the physical and functional information of each component of the network. On the other hand, in municipalities where there is full control of the information on the sewerage network, it presents advantages in the stages of diagnosis and planning of optimization and expansion works. In this document, a compilation of information is presented, taking the results of the analyses of parameters and requirements of the main companies that provide sewerage services in Colombia and some experiences from some engineering professionals who carry out consulting work are compiled. This collection of information is presented as a state of the art and in a set of requirements to advance the registry work, with the aim of prioritizing the efforts in the execution of certain key activities to achieve a sewerage registry in an efficient and effective way with actual results.

After having determined the key activities and their requirements for registries, a methodology is proposed and considers the potential use of computational tools, including the design of an application, which will support the development of field work in the capture and storage of structured information that can be downloaded for post processing out-of-site. Finally, the proposed methodology and the tool designed are applied to a case study to establish a comparison and determine possible advantages in the development of registry work.

This document provides some recommendations about performing a sewerage registry, from procedural actions, from field work such as the marking of the system components and the proper way to take the photographic record. In addition, the advantages of forming a geographic information system, developed from the related database obtained from the reports of the developed app, are highlighted.

**Keywords:** Sewerage system, sewerage registry, structures inventory.

## INTRODUCCIÓN

El catastro de alcantarillado es un sistema de captura, manejo, archivo y actualización de información acerca de los componentes de la red, conformado por una localización, una descripción física detallada y una evaluación funcional de cada estructura que integra el sistema, con la función principal de servir como herramienta de análisis, evaluación y planificación de intervenciones en la red.

Para un municipio, tener un catastro de alcantarillado actualizado representa una oportunidad de gestionar los recursos en otras actividades de la optimización del sistema de alcantarillado (diagnóstico, análisis de alternativas y diseño de optimización) y no invertir en la investigación en campo de los componentes del sistema.

Del mismo modo, para el consultor o contratista que esté encargado de una consultoría de diseño para optimizar y ampliar un alcantarillado existente o deba desarrollar un plan maestro de alcantarillado, el hecho de contar con un catastro actualizado es un apoyo importante para el diagnóstico del sistema, lo cual brinda un primer criterio para la optimización de este.

En este artículo se muestra el resultado de los trabajos realizados para identificar y recoger parámetros y requerimientos de las principales empresas prestadoras de servicio de alcantarillado en Colombia. Dicha recopilación de información se presenta como estado del arte y como un conjunto de requerimientos para efectuar los trabajos de catastro, con el objetivo de priorizar los esfuerzos en la ejecución de ciertas actividades claves para llegar a realizar un catastro de alcantarillado de una manera eficiente y eficaz, con resultados veraces.

Luego de haber determinado las actividades claves y sus requerimientos para los catastros, en el desarrollo de este trabajo se estructura, con base en lo establecido, una metodología para la ejecución de los trabajos del catastro de alcantarillado, el cual se propone contemplando el uso potencial de herramientas computacionales, entre las que se incluye una aplicación para herramientas móviles, diseñada a partir de las actividades claves y los parámetros o requerimientos establecidos, con el apoyo de IEH Grucon S.A., empresa colombiana de ingeniería de consulta y gestión de proyectos con la que se desarrolló una aplicación que facilita el levantamiento, el respaldo y la presentación de la información del sistema de alcantarillado, para luego conformar una metodología

que compila algunas recomendaciones técnicas para la ejecución ordenada y eficaz de cada actividad.

Por último, se aplican la metodología propuesta y la herramienta concebida a un estudio de caso en el que, además, se comparan el desarrollo de las actividades conducentes a obtener un catastro de redes de alcantarillado con y sin ayuda de la *app* diseñada, para establecer una comparación y determinar posibles ventajas en la realización de los trabajos de catastro.

## RESULTADOS

Después de haber planteado la metodología para el buen desarrollo de los catastros de redes de alcantarillado y haber definido las características de la aplicación para apoyar las labores de captura de la información levantada en campo por las comisiones de inspección y topografía, así como de la herramienta para reportar la información levantada, ahora se requiere establecer su funcionalidad, bondades o falencias. Para este propósito se planteó la ejecución de pruebas, las cuales se presentan en este capítulo.

En la metodología planteada se consideró como opción el desarrollo de una herramienta computacional, como forma de optimizar recursos y tiempo, para la ejecución de algunas labores que anteriormente se hacían en forma manual y tomaban tiempo para su organización y transcripción.

Tras el desarrollo y la puesta en marcha de la aplicación se efectuaron algunas pruebas de escritorio para comprobar el tiempo en la captura y en el procesamiento de la información realizando la actividad de registro de la información primero de la manera tradicional y luego con la aplicación, para determinar el tiempo en el cual se optimizan la actividad de captura y el procesamiento de la información.

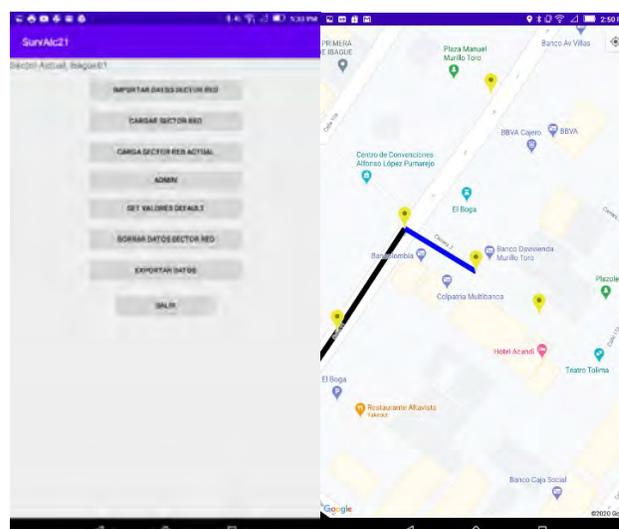
Posteriormente, se conformó una compilación de requerimientos normativos y técnicos provenientes de la normativa vigente y de estándares de las empresas prestadoras del servicio de alcantarillado, en la cual se conformaron los atributos y dominios que se deben manejar en un catastro de un sistema de alcantarillado.

En atención a las actividades claves y la información que se requiere levantar para conformar un catastro de alcantarillado, se generó una metodología para planificar y ejecutar todas las actividades en un levantamiento de catastro de un sistema de alcantarillado, brindando algunas recomendaciones en las acciones procedimentales del trabajo en campo.

En cada una de las actividades que se contemplan en la metodología del levantamiento del catastro de alcantarillado se dan consejos y pasos para evitar que ocurran reprocesos en el desarrollo normal de un levantamiento de alcantarillado, proporcionando con esto una herramienta para realizar trabajo eficaz y eficiente.

En el desarrollo de este artículo se diseñaron dos herramientas computacionales: una aplicación denominada “Programa Android y Google Maps API SURVALC21”, y una aplicación en Visual Basic para Excel, destinada a ordenar y reportar la información levantada en campo, con el fin de que los consultores y operadores puedan ejecutar labores de ampliación o rehabilitación de dichos sistemas con base en esta información.

Dicha herramienta facilita el respaldo de la información levantada en campo, disminuye el tiempo para procesar la información y agiliza la organización del archivo fotográfico.



La aplicación se desarrolló con la ayuda de la consultoría IEH Grucon S.A., en la plataforma de Android Google Maps y la tecnología GeoJSON de intercambio de información geográfica, con el objetivo de que sea una herramienta para el levantamiento de información de pozos y tramos de alcantarillado, y la construcción gráfica interactiva de la topología de la red.

Finalmente, se realizaron dos pruebas de las herramientas computacionales, una de escritorio y una en campo, las cuales evidenciaron que el tiempo necesario para el procesamiento y la organización de la información se reduce drásticamente, con lo que se logra un respaldo rápido y seguro de la información levantada en campo.



# EciSewer: programa de uso libre para el diseño de redes de alcantarillado en perfil

## EciSewer: Free software to design profile sewerage networks

MIGUEL ALEJANDRO JIMÉNEZ BARAJAS<sup>1</sup> - GERMÁN RICARDO SANTOS GRANADOS<sup>2</sup>

1. Magíster en Ingeniería Civil.

2. Director de tesis.

miguel.jimenez-b@mail.escuelaing.edu.co - german.santos@escuelaing.edu.co

Recibido: 10/01/2021 Aceptado: 25/01/2021

Disponible en [http://www.escuelaing.edu.co/es/publicaciones\\_revista](http://www.escuelaing.edu.co/es/publicaciones_revista)  
<http://revistas.escuelaing.edu.co/index.php/reci>

### Resumen

Las infraestructuras de alcantarillado permiten coleccionar y transportar las aguas de las zonas pobladas a una disposición del fluido. Ya sea por la inexistencia o deficiencia de la infraestructura, se requieren herramientas para implementar o diagnosticar el servicio de alcantarillado, entre éstas programas para el diseño y modelación de redes. Las herramientas de uso común en el diseño de redes de alcantarillado traen consigo uno o varios problemas relacionados con su utilización y propósito, tales como los costos del *software* comercial, la necesidad de una capacitación a la medida del *software* empleado, y en general su poca flexibilidad y nula posibilidad de ajustes.

Una alternativa de solución para los problemas asociados a los costos y la flexibilidad es la generación de *software* libre para el diseño de redes de alcantarillado en perfil, lo cual le dará al usuario la oportunidad de ajustar los aspectos necesarios para mejorar el diseño o potenciar su rendimiento. El *software* propuesto se desarrolló en lenguaje de programación Python, y resuelve, con bases conceptuales soportadas en desarrollos matemáticos consecuentes con la normativa vigente, la física de elementos de las redes de alcantarillado en perfil.

**Palabras claves:** sistema de alcantarillado, diseño hidráulico de alcantarillados, superficie libre, canales abiertos.

### Abstract

Sewerage networks enable the collection and transport of waters from populated zones to dispose the fluid. As a result of either a lacking or deficient infrastructure, tools are required to implement or diagnose the sewerage system, e.g. design and modeling software. Frequently used tools for designing sewerage networks bring about one or several problems regarding their usage and purpose, such as the price of commercial software, custom-training for the specific software, and, in general, its poor flexibility and a virtually non-existent customization. An alternative solution for problems associated to costs and customization is the generation of free software to design profile sewerage networks, which will allow the end user to set up the necessary aspects to improve their design or enhance its performance. The proposed software was developed in Python and works out, based on conceptual arguments supported on relevant mathematical developments and current regulations, the physics of profile sewerage networks elements.

**Keywords:** Sewerage system, hydraulic sewerage design, free surface, open channels.

## INTRODUCCIÓN

El diseño de las redes de alcantarillado tiene dos componentes principales: la topología de la red y el diseño hidráulico. La topología de la red en planta define el recorrido del fluido de acuerdo con las necesidades de descarga de una población. El diseño hidráulico determina la topología en perfil de cada tubería, cuyas restricciones se definen según la normativa vigente y los criterios de diseño hidráulico.

El propósito principal es crear un *software* de uso libre para el diseño de redes de alcantarillado en perfil en flujo uniforme, es decir, implementar un modelo numérico en un *software* de uso libre, que permita diseñar redes de alcantarillado en perfil de forma eficiente, sencilla y de bajo costo. El *software* genera una solución hidráulica tubo a tubo de redes de alcantarillado, minimizando el costo de suministro e instalación de la tubería al analizar cada tramo individualmente. Los costos se calculan mediante el análisis de precios unitarios y de funciones de costos.

## METODOLOGÍA

### Desarrollo computacional

A partir de la información conocida de la topología en planta de una red de alcantarillado y sus cotas rasantes en

los pozos, información de tuberías comerciales y valores iniciales, y por defecto de variables y restricciones, el programa genera una solución hidráulica tubo a tubo. Esta solución hidráulica se da para tuberías comerciales conocidas, seleccionando la de menor costo por medio de funciones de costos y un análisis de precios unitarios.

El programa utiliza como interfaz gráfica de usuario (GUI) el Quantum GIS (QGIS), programa de uso libre en el que se generan capas temporales para la visualización de la información procesada, como la topología en planta y en perfil de la red; además, produce un archivo con la topología de la red en planta y perfil, así como los datos necesarios para su importación en los programas SWMM y SewerGems. El archivo no está configurado para la ejecución de la red en flujo gradualmente variado. Se requiere que el usuario ajuste la variación de caudales en función del tiempo al utilizarse en SWMM o en SewerGems. El archivo no está configurado para la ejecución de la red en flujo no permanente. Se requiere que el usuario ingrese información de la variación de caudales en función de series de tiempo para emplearse en SWMM o en SewerGems.

El aplicativo permite la posibilidad de utilizar la biblioteca SWMM5 para Python, con el fin de que el usuario tenga el potencial del uso de SWMM desde el aplicativo y no desde una ejecución independiente del programa.

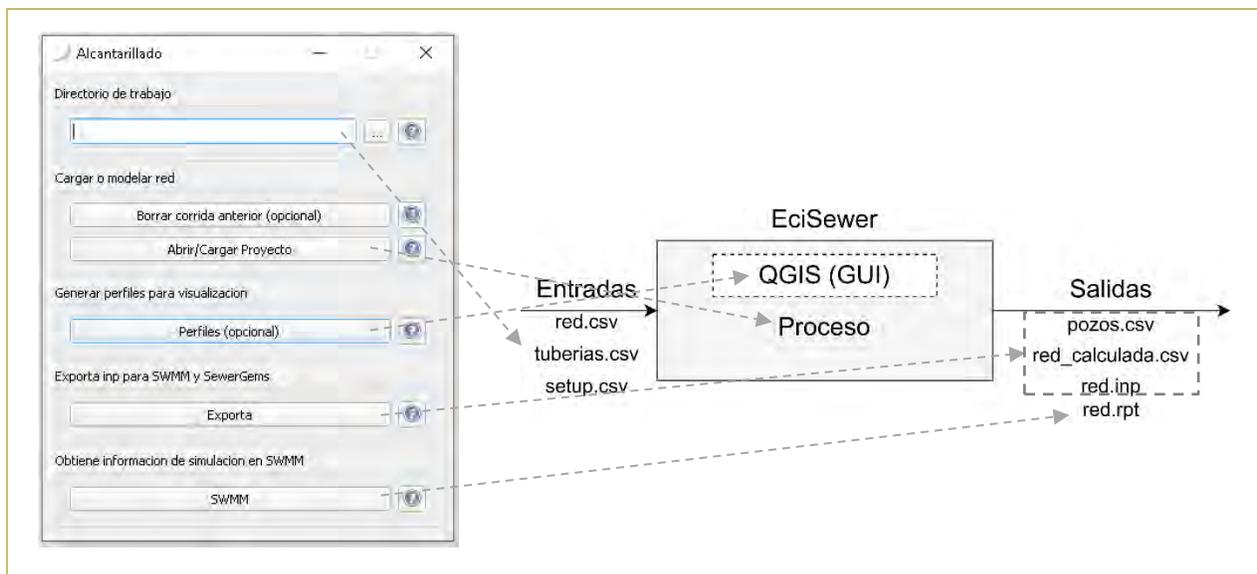


Figura 1. Formulario del aplicativo.

Figura 2. Algoritmo de entrada, proceso y salida.

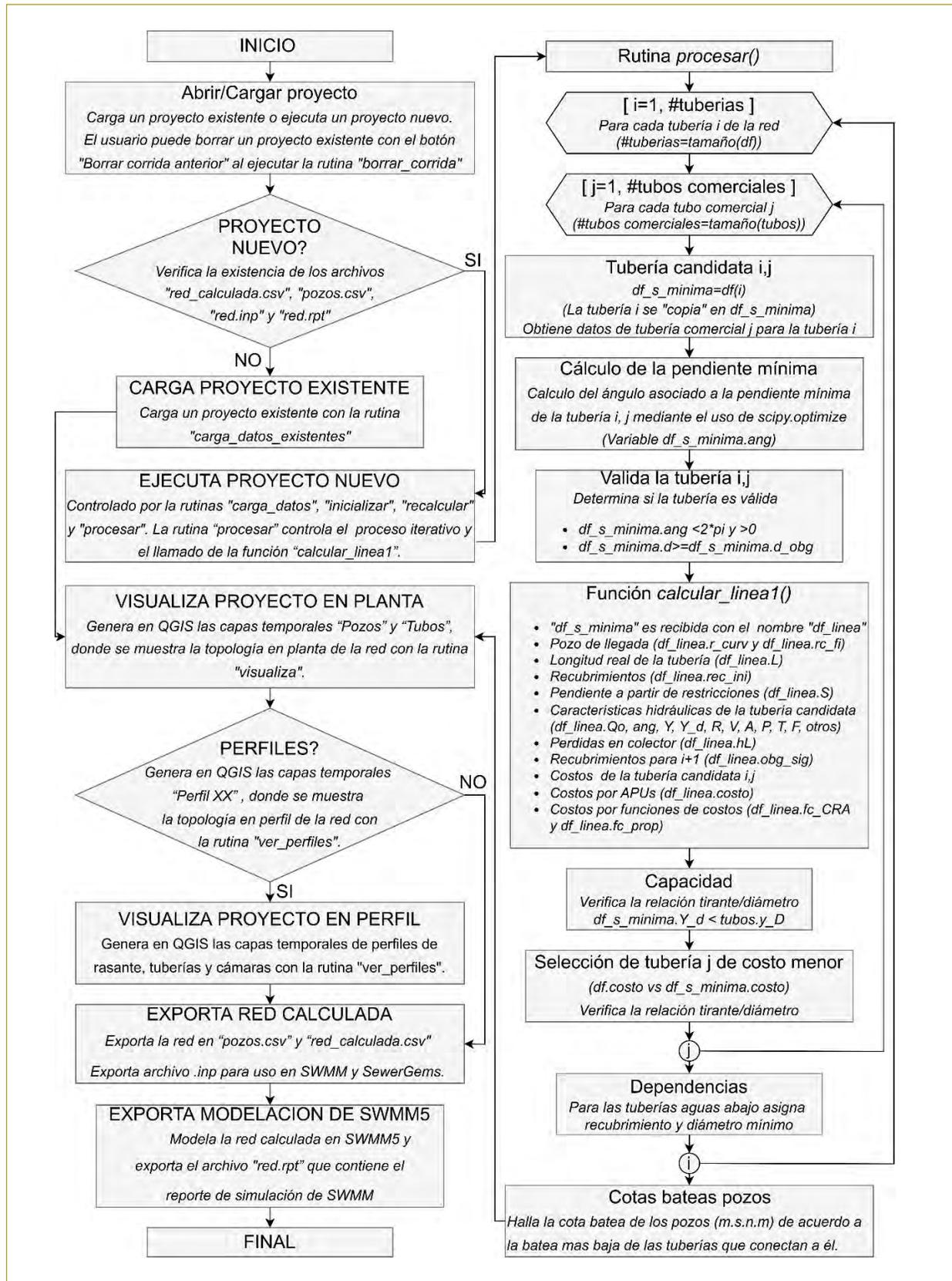


Figura 3. Diagrama de flujo del algoritmo.

El diagrama de flujo del algoritmo muestra la interacción de las principales rutinas del programa. Está organizado de tal manera que el proceso iterativo de selección de tuberías se muestre en la parte derecha de la figura:

**Cálculo de costos**

**Análisis de precios unitarios**

Se seleccionaron precios unitarios de los costos de suministro e instalación de tubería de la prestadora de servicios públicos de acueducto y alcantarillado de la ciudad de Bogotá (EAAB).

**Funciones de costos**

Se emplearon dos funciones de costos de tipo potencial de la forma  $y = ax + b$ , donde los coeficientes están asociados a los costos de la tubería y a los costos de excavación. Una función de costos se construyó a partir del análisis de precios unitarios y su ajuste a una curva potencial. La segunda función de costos se tomó de la propuesta de la Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico (CRA) (revista *Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico* (15), agosto de 2009), en la que a partir de una base de datos de 224 proyectos de alcantarillado, se plantean funciones respecto a su diámetro.

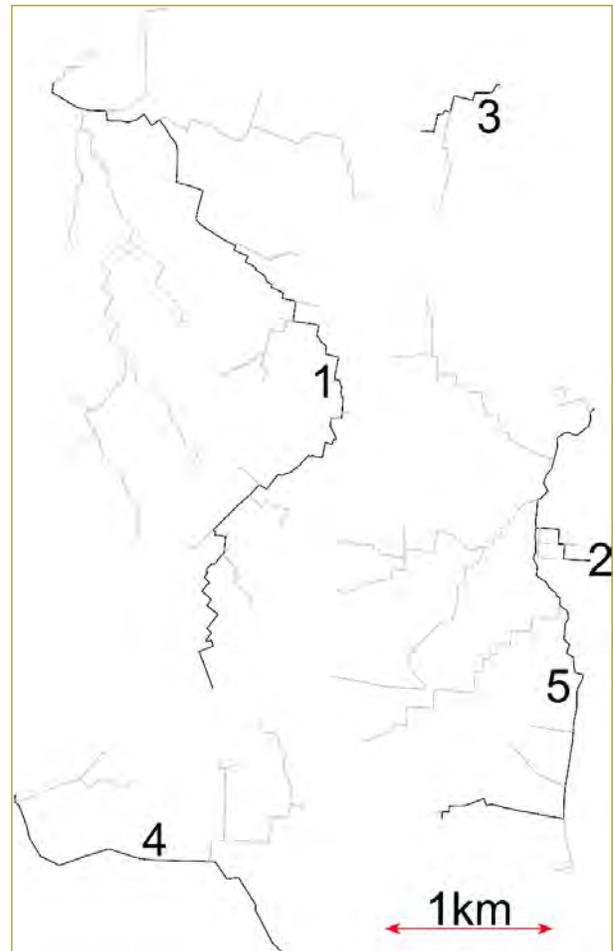
**RESULTADOS**

**Casos de estudio**

El *software* cuenta con cinco topologías en planta que incluyen la cota rasante de los pozos. La ejecución de la obra civil de estas redes de alcantarillado se desarrolló en la zona de Flor de Bastión de la ciudad de Guayaquil, entre los años 2013 y 2015.

**Tabla 1**  
Descripción de casos de estudio

| Red       | Ejem-plo01 | Ejem-plo02 | Ejem-plo03 | Ejem-plo04 | Ejem-plo05 |
|-----------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Pozos     | 474        | 22         | 32         | 105        | 323        |
| Tramos    | 473        | 21         | 31         | 104        | 322        |
| Longitud  | 19.447,53  | 1006,15    | 1384,67    | 5663,94    | 13.446,95  |
| Tipo      | AASS       | AASS       | AALL       | AALL       | AALL       |
| Área (ha) | 637,24     | 10,12      | 51,91      | 541,08     | 638,04     |



**Figura 4.** Esquema en planta de los casos de estudio.

Para cada una de las redes se comparó información de interés de la red diseñada, como costos, demanda computacional y características hidráulicas de la red.

**Costo computacional en pruebas de ejecución**

A continuación se presentan las características de las redes de referencia, incluyendo el costo computacional del diseño en perfil de la red:

**Tabla 2**  
Costo computacional de casos de estudio

|                   | Ejemplo01 | Ejem-plo02 | Ejem-plo03 | Ejem-plo04 | Ejemplo05 |
|-------------------|-----------|------------|------------|------------|-----------|
| Pozos             | 474       | 22         | 32         | 105        | 323       |
| Tramos            | 473       | 21         | 31         | 104        | 322       |
| Longitud          | 19.447,53 | 1006,15    | 1384,67    | 5663,94    | 13.446,95 |
| Tipo              | AASS      | AASS       | AALL       | AALL       | AALL      |
| Tiempo proceso(s) | 185       | 10,94      | 15,69      | 50,37      | 312,65    |

Se observa una demanda de tiempo adicional en las tuberías pluviales, debido a los reprocesos en el cálculo de la velocidad del fluido y en el tiempo de concentración de la red.

### Comparación del costo mediante análisis de precios unitarios respecto a las funciones de costos

Las funciones de costos se comparan con los costos calculados mediante análisis de precios unitarios. Se hallan errores relativos porcentuales agrupados por diámetro y por volumen de excavación por metro lineal, obteniendo un estimativo de la calidad de la aproximación de las funciones de costos en términos de un error relativo porcentual.

**Tabla 3**

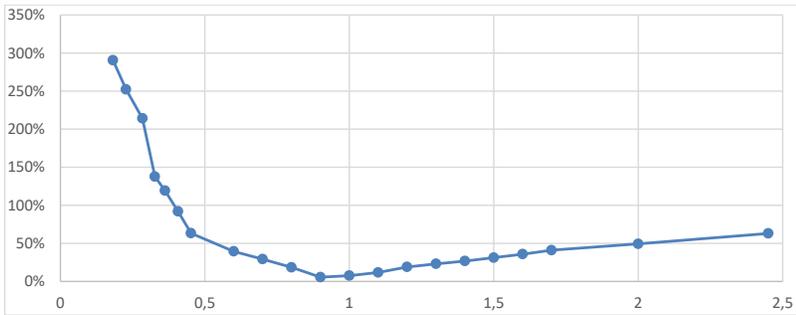
Comparación de funciones objetivo respecto al cálculo de costos mediante precios unitarios

| D (m) | % de error<br>Función<br>de costos<br>CRA | % de error<br>Función<br>de costos<br>propia | Vol/ml<br>(m3) | % de error<br>Función<br>de costos<br>CRA | % de error<br>Función<br>de costos<br>propia |
|-------|---|--|----------------|---|--|
| 0,182 | 290,48 %                                  | 7,95 %                                       | 1              | 314,59 %                                  | 6,81 %                                       |
| 0,227 | 252,25 %                                  | 4,20 %                                       | 2              | 213,75 %                                  | 6,61 %                                       |
| 0,284 | 214,17 %                                  | 0,65 %                                       | 3              | 109,45 %                                  | 11,05 %                                      |
| 0,327 | 137,70 %                                  | 10,59 %                                      | 4              | 52,61 %                                   | 7,74 %                                       |
| 0,362 | 119,31 %                                  | 10,43 %                                      | 5              | 23,58 %                                   | 5,03 %                                       |
| 0,407 | 92,04 %                                   | 11,52 %                                      | 6              | 14,33 %                                   | 3,45 %                                       |
| 0,452 | 63,36 %                                   | 19,93 %                                      | 7              | 17,99 %                                   | 3,83 %                                       |
| 0,6   | 39,52 %                                   | 8,54 %                                       | 8              | 21,94 %                                   | 3,98 %                                       |
| 0,7   | 29,26 %                                   | 5,38 %                                       | 9              | 22,59 %                                   | 5,02 %                                       |
| 0,8   | 18,50 %                                   | 2,64 %                                       | 10             | 26,92 %                                   | 5,73 %                                       |
| 0,9   | 5,59 %                                    | 3,36 %                                       | 11             | 33,44 %                                   | 7,35 %                                       |
| 1     | 7,61 %                                    | 4,80 %                                       | 12             | 28,76 %                                   | 6,42 %                                       |
| 1,1   | 11,76 %                                   | 0,57 %                                       | 13             | 50,26 %                                   | 3,73 %                                       |
| 1,2   | 19,04 %                                   | 0,21 %                                       | 14             | 50,29 %                                   | 3,27 %                                       |
| 1,3   | 23,12 %                                   | 3,60 %                                       | 15             | 49,51 %                                   | 3,11 %                                       |
| 1,4   | 26,77 %                                   | 6,88 %                                       | 16             | 48,87 %                                   | 3,01 %                                       |
| 1,5   | 31,23 %                                   | 7,70 %                                       | 18             | 50,65 %                                   | 3,20 %                                       |
| 1,6   | 35,85 %                                   | 7,49 %                                       | 19             | 45,27 %                                   | 2,33 %                                       |
| 1,7   | 40,99 %                                   | 5,81 %                                       | 20             | 43,55 %                                   | 2,07 %                                       |
| 2     | 49,38 %                                   | 3,09 %                                       | 21             | 43,86 %                                   | 2,08 %                                       |
| 2,45  | 63,06 %                                   | 9,25 %                                       | 22             | 64,22 %                                   | 9,15 %                                       |
|       |   |  | 23             | 66,46 %                                   | 8,88 %                                       |
|       |   |  | 24             | 63,96 %                                   | 9,11 %                                       |
|       |   |  | 25             | 61,96 %                                   | 9,39 %                                       |
|       |   |  | 26             | 60,87 %                                   | 9,48 %                                       |

Se aprecian diferencias importantes entre el cálculo mediante precios unitarios y la función de costos propuesta por la Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico. Son en promedio del 7 %, y se concentran en los diámetros y volúmenes de excavación más pequeños; sin embargo, se recomienda la selección de las tuberías solamente por el análisis por precios unitarios.

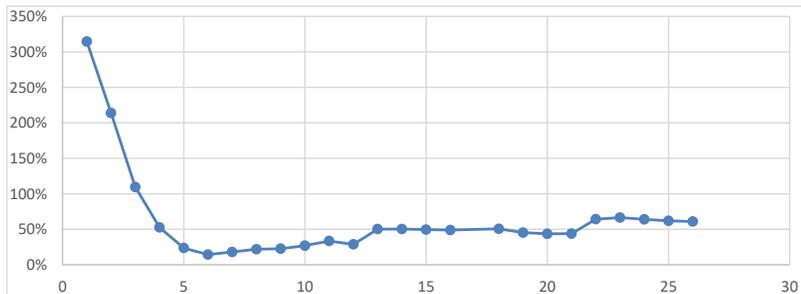
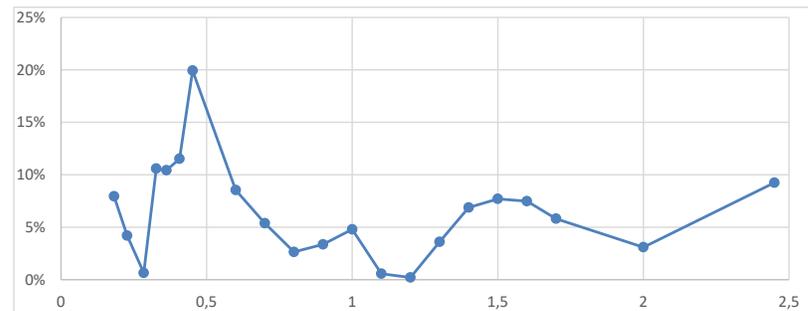
### CONCLUSIONES

- El *software* cumple con el objetivo de diseñar la topología en perfil de la red seleccionada, calculada con el menor costo de acuerdo con las restricciones hidráulicas indicadas por las normas de referencia.
- El programa, a partir de la información conocida de la topología en planta de una red de alcantarillado y las cotas rasantes de los pozos, genera una solución hidráulica de menor costo utilizando flujo uniforme mediante funciones de costos y análisis de precios unitarios. La topología de la red en planta y perfil se puede usar en programas con el potencial de modelar flujo gradualmente variado, como SWMM y SewerGems.
- El *software* se generó con el lenguaje de programación Python y se ejecuta en el entorno de desarrollo (IDE) de QGIS.
- Las herramientas de uso común para la modelación de redes de alcantarillado, como SWMM y SewerGems, permiten tanto la modelación en flujo gradualmente variado como el diseño de las redes con un bajo nivel de automatización. EciSewer, a pesar de diseñar solo en perfil de la red seleccionada y en flujo uniforme, lo hace con un nivel completo de automatización; además, se puede utilizar la topología de la red que genera para la modelación en los programas mencionados.
- La interfaz gráfica de usuario en QGIS permite la visualización de la información de la topología de la red en planta y perfil, así como la manipulación y visualización gráfica de cualquier información, principalmente de manera vectorial; adicionalmente, mediante ajustes menores, se puede mostrar la información de acuerdo con las necesidades del usuario, ya que no es obligatoria la programación en Python. Así mismo, deja producir interfaces de visualización para la generación de planos.



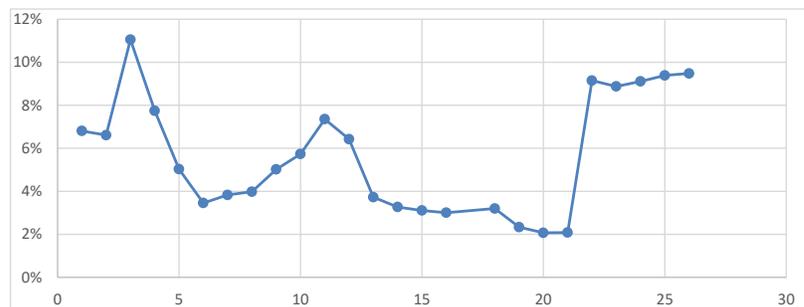
**Figura 5.** Error relativo porcentual. Costo calculado vs. Función de costos CRA (1) (agrupados por diámetro).

**Figura 6.** Error relativo porcentual. Costo calculado vs. Función de costos propia (1) (agrupados por diámetro).



**Figura 7.** Error relativo porcentual. Costo calculado vs. Función de costos CRA (2) (agrupados por volumen de excavación por metro)

**Figura 8.** Error relativo porcentual. Costo calculado vs. Función de costos propia (2) (agrupados por volumen de excavación por metro)



- El *software* EciSewer es de libre uso, y su código fuente, documentación y futuras actualizaciones son de dominio público. Estarán disponibles en el portal de GitHub, en el *link* <https://github.com/jimenezbarajasmiguel/EciSewer>.
- Los valores obtenidos en las ejecuciones de la red exportada por el *software* en SWMM y en Sewer-Gems son consistentes y sus valores son muy cercanos a los calculados por el aplicativo.

- De los análisis hechos, no se recomienda el uso de las funciones objetivo de costos, puesto que no representa una ventaja respecto al cálculo del costo asociado al suministro e instalación de la tubería, mediante el análisis de precios unitarios.

### Trabajo futuro

La utilización del portal de GitHub permite que cualquier usuario reporte fallos menores o recomendaciones de nuevo alcance, así como la posibilidad del uso total o parcial del código en otros proyectos.

Para la descripción del trabajo futuro se parte del potencial deseable en un *software* para el diseño de alcantarillado. Un aplicativo completo para el diseño de redes de alcantarillado debe ayudar a solucionar, a partir de la ubicación de los pozos en planta, la topografía del área de interés y los caudales asociados a los pozos, al igual que la solución en planta y en perfil de la topología de la red. Además, no debe limitarse al cálculo de la red con la restricción de flujo uniforme. Los alcances deseables deben incluir algoritmos para lo siguiente:

- Trazar la red en planta a partir de la solución del trazado de la tubería entre nodos. Este problema se puede resolver mediante la solución de la conexión entre nodos, usando programación no lineal u otras metodologías de programación.
  - Optimizar grupos de tuberías mediante técnicas de programación y métodos de procesamiento más complejos, ya sean métodos metaheurísticos como el recocido simulado o métodos evolutivos, donde se pueden optimizar grupos de tuberías como una entidad, evitando la solución tubo a tubo de la red.
  - Permitir solucionar la topología en perfil a partir del punto de descarga hacia aguas arriba, para los problemas en que se tiene una restricción en la cota de llegada.
  - Hacer el cálculo de costos sin olvidar incluir la opción de ingresar la rasante y calcular los costos asociados a los pozos.
- El archivo exportado para uso en SWMM o SewerGems no está configurado para la ejecución de la red en flujo no permanente. Se debe permitir que el usuario ingrese información de la variación de caudales en función de series de tiempo para utilizarse en SWMM o en SewerGems. De manera similar, esta información puede usarse con el complemento de SWMM5 para generar modelaciones de redes de alcantarillado en flujo gradualmente variado y no permanente

### REFERENCIAS

- Bentley (2021, 10 de abril). *SewerGEMS. Software de modelado para alcantarillados sanitarios y combinados*. Obtenido de <https://www.bentley.com/es/products/product-line/hydraulics-and-hydrology-software/sewergems>.
- Duque, N. (2015). *Metodología para el diseño optimizado de redes de alcantarillado* (tesis de maestría). Universidad de los Andes. Obtenido de <https://repositorio.uniandes.edu.co/handle/1992/13046>.
- Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (2020). *Norma técnica del servicio NS-085. Criterios de diseño de sistemas de alcantarillado*. Recuperado el 22 de febrero de 2021, de <https://www.acueducto.com.co/webdomino/sistec/consultas.nsf>.
- Empresas Públicas de Medellín (2013). *Guía para el diseño hidráulico de redes de alcantarillado*. Recuperado el 25 de marzo de 2021, de [https://www.epm.com.co/site/Portals/0/centro\\_de\\_documentos/GuiaDisenoHidraulicoRedesAlcantarillado.pdf](https://www.epm.com.co/site/Portals/0/centro_de_documentos/GuiaDisenoHidraulicoRedesAlcantarillado.pdf).
- Marín, C., Revollo, D., Del Valle, J., & Irreño, N. (2007). Estudio de estructuración y análisis de información de inversiones de los prestadores de acueducto y alcantarillado. *Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico* (15), 104-133. Obtenido de <https://www.cra.gov.co/revista-ndeg-15>.
- Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio (2017). *Resolución 330. Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico - RAS*. Recuperado el 12 de marzo de 2021, de <https://www.minvivienda.gov.co/viceministerio-de-agua-y-saneamiento-basico/reglamento-tecnico-sector/reglamento-tecnico-del-sector-de-agua-potable-y-saneamiento-basico-ras>.
- Quantum GIS (2021, 5 de agosto). *QGIS. Sistema de información geográfica libre y de código abierto*. Obtenido de <https://qgis.org/es/site/>.
- Torres, L. (2013). *Métodos de diseño en redes de alcantarillado* (tesis de maestría). Universidad de los Andes. Obtenido de <https://repositorio.uniandes.edu.co/handle/1992/19576>.
- United States Environmental Protection Agency (2021, 9 de marzo). *Storm Water Management Model (SWMM) Water Research US EPA (5.1)*. Obtenido de <https://www.epa.gov/water-research/storm-water-management-model-swmm>.



# Estructura escalonada con flujo rasante para realizar la entrega de un afluente a un canal realineado

## Stepped structure with skimming flow to deliver and affluent to a realigned channel

HÉCTOR ALFONSO RODRÍGUEZ DÍAZ<sup>1</sup> - ANDRÉS HUMBERTO OTÁLORA CARMONA<sup>2</sup>

1. Profesor titular de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Bogotá, D.C., Colombia.

2. Profesor asistente de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Bogotá, D.C., Colombia.

alfonso.rodriguez@escuelaing.edu.co - andres.otalora@escuelaing.edu.co

Recibido: 17/01/2021 Aceptado: 20/02/2021

Disponible en [http://www.escuelaing.edu.co/es/publicaciones\\_revista](http://www.escuelaing.edu.co/es/publicaciones_revista)  
<http://revistas.escuelaing.edu.co/index.php/reci>

### Resumen

El manejo ambiental de un proyecto de explotación minera a cielo abierto en Colombia exige el desarrollo de acciones que aseguren mantener y preservar las condiciones del medio natural. La empresa Drummond Ltd. realiza actualmente una explotación minera en el sur del departamento del Cesar, y dentro de su plan de manejo ambiental debe construir diferentes obras de ingeniería que aseguren la restauración de la cuenca, especialmente en la zona intervenida.

Parte de las obras que se van a llevar a cabo incluyen el diseño y la construcción del realineamiento del cauce principal y, por tanto, el correspondiente manejo de las entregas de los afluentes a este, teniendo en cuenta las mejores prácticas ambientales e hidráulicas adecuadas para solucionar los cambios en las nuevas cotas de entrega al río, que aseguren el adecuado funcionamiento del sistema de drenaje de la cuenca y, adicionalmente, garantizar el libre movimiento de su fauna acuática por el sistema de drenaje.

**Palabras claves:** estructura escalonada, flujo rasante, disipación de energía.

### Abstract

The environmental management of an open-pit mining project in Colombia requires the development of actions that ensure to keep and preserve the conditions of the natural environment. The company Drummond Ltd. is performing a mining operation in the southern department of Cesar and, continuing its environmental management plan, they must construct different engineering structures that ensure the restoration of the basin, especially in the intervened zone.

Part of the works to be developed include the design and construction of the realignment of the main channel, managing the deliveries of the tributaries. Given the best environmental and hydraulic practices, their objectives are to solve the changes in the new levels of delivery to the river, to ensure the right functioning of the drainage system of the basin, and to allow the free movement of its aquatic fauna through the drainage system.

**Keywords:** stepped structure, skimming flow, energy dissipation.

## INTRODUCCIÓN

En este artículo se presentan las consideraciones técnicas y conceptuales correspondientes al diseño de una estructura de entrega y disipación de energía que permite descargar, de manera segura, las aguas de la corriente natural denominada Caño Piedras al nuevo canal de realineamiento del arroyo San Antonio, en el departamento del Cesar, canal artificial diseñado para modificar el alineamiento del cauce natural, con el propósito de permitir una explotación minera a cielo abierto, explotación que realiza la empresa minera Drummond Ltd.

En ese orden de ideas, se ha proyectado una estructura escalonada con flujo rasante y unas obras anexas que complementan adecuadamente dicha entrega, con el objetivo de reducir al máximo la energía residual entre la corriente del Caño Piedras y el canal del realineamiento del arroyo San Antonio, debido a la diferencia topográfica presente entre las dos corrientes y teniendo en cuenta las características geomorfológicas de la entrega.

Para definir las dimensiones de la estructura fue necesario analizar las variables hidrológicas, tales como la escorrentía y la precipitación de la zona, con el propósito de estimar los caudales máximos instantáneos que definen el tamaño, tipo y detalles de la estructura. Se requirió hacer el levantamiento topográfico del último tramo de la corriente, información que se procesó y analizó a partir de la herramienta de procesamiento de información geográfica ArcGis, generando así un modelo simplificado de terreno.

Con base en las condiciones hidrológicas de la zona, se evaluó y determinó el caudal de diseño de la estructura. Se definió el área de drenaje a partir del modelo de terreno generado con la topografía disponible y complementada con fotorrestituciones. Adicionalmente, se precisaron las características de la lluvia de diseño a partir del modelo hidrológico disponible gracias a Drummond Ltd. y desarrollado por la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito (Centro de Estudios Hidráulicos, 2016).

Para definir las dimensiones de la estructura hubo necesidad de considerar las limitaciones propias del terreno, las características geomorfológicas de la zona, las características de las corrientes, tales como su sección transversal, la dinámica fluvial de la corriente, el presupuesto y los materiales disponibles, para finalmente seleccionar una estructura cuya geometría permitiera

controlar la mayor cantidad de energía para las condiciones particulares de eventos extremos.

## ANTECEDENTES DEL PROYECTO

En este trabajo se toman en cuenta los estudios previos detallados ejecutados sobre este realineamiento, que incluyen la revisión de la información hidrológica y el tránsito hidrológico mediante el modelo HEC-HMS. Se utilizan como referencias principales las condiciones, parámetros y modelos planteados y desarrollados en el estudio denominado “Consultoría para la evaluación de estudios hidrológicos e hidráulicos en las cuencas en estado natural que conforman el área minera del centro del Cesar. Caudales máximos y mínimos”, llevado a cabo por la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

Así mismo, se seleccionó la estructura tipo escalonada de flujo rasante como la estructura de disipación de energía para la entrega del Caño Piedras al canal de realineamiento. Esta selección se hizo después de analizar varias estructuras de disipación, considerando la topografía y cómo se disipa la energía cinética, las facilidades constructivas y las particularidades topográficas de la corriente.

En este trabajo se incluye un análisis detallado del trazado en planta y en perfil de la estructura, así como el dimensionamiento correspondiente a las secciones transversales, que han permitido proponer una transición entre el cauce natural y la estructura para asegurar unas condiciones adecuadas de flujo en esta zona.

## MODELO SIMPLIFICADO DEL TERRENO

Con base en el levantamiento topográfico realizado en la zona del Caño Piedras, se analizó, filtró y depuró la información correspondiente a los puntos topográficos levantados.

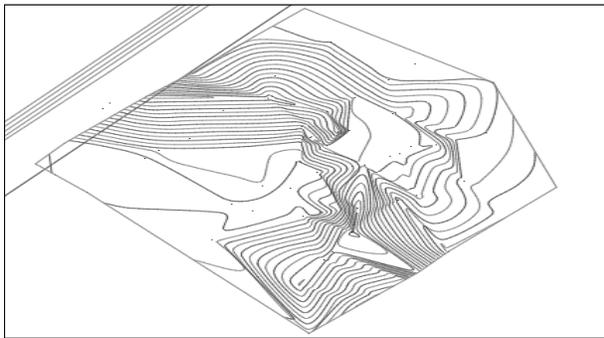
Después de la depuración de los datos topográficos, se construyó un modelo de terreno de la zona correspondiente a la entrega de la corriente y se generaron las curvas de nivel pertinentes.

Igualmente, con la topografía disponible se estableció de manera preliminar el eje principal de la estructura, tomando como referencia los puntos más bajos del cauce. También fue posible establecer la sección dominante, para analizar las características hidráulicas de la corriente y las posibles dimensiones de la estructura.

El Caño Piedras es una corriente intermitente, por lo que su alineamiento en planta cambia, dependiendo de la condición hidrológica de la cuenca. Establecer la sección del cauce correspondiente a la condición dominante genera incertidumbre en los procesos dinámicos y dificulta definir la configuración en planta de una estructura de entrega.

Definido el cauce principal de la corriente y analizadas todas las variables geomorfológicas de la zona, fue posible definir el eje de la obra de disipación, las secciones transversales y el perfil longitudinal a partir del modelo de terreno; esto permitió obtener las características topográficas necesarias para el dimensionamiento de la estructura de entrega del Caño Piedras al realineamiento definitivo.

A continuación se presenta la topografía de la zona de entrega del Caño Piedras al realineamiento # 4 del arroyo San Antonio (figura 1).



**Figura 1.** Modelo de terreno simplificado del Caño Piedras en la zona de entrega al realineamiento # 4 del arroyo San Antonio.

## CAUDAL DE DISEÑO

Para la determinación del caudal de diseño se utilizó el estudio efectuado por la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, denominado “Estudio y diseño hidrológico e hidráulico del arroyo San Antonio # 4”. En este estudio se fijaron los caudales máximos instantáneos para distintos periodos de retorno.

Para establecer el periodo de retorno del caudal de diseño de la estructura, se analizaron en detalle la ubicación de la estructura, el riesgo de colapso y la vida útil del proyecto. Se seleccionó 50 años como el periodo de recurrencia del evento extremo. A partir del estudio descrito anteriormente y del modelo hidrológico desarrollado para la zona se obtuvo un caudal de 55

m<sup>3</sup>/s, como caudal máximo para 50 años de periodo de retorno.

## DISEÑO HIDRÁULICO DE LA ESTRUCTURA ESCALONADA. FLUJO RASANTE

Establecidos los caudales de diseño y las características topográficas de la zona, se seleccionaron varias estructuras de disipación de energía y se determinó que una estructura tipo escalonada con flujo rasante podría ser la más apropiada, teniendo en cuenta las características propias del proceso constructivo en la zona y las características establecidas para el flujo en la zona de entrega.

Inicialmente, se planteó el diseño de una estructura flexible usando elementos tales como bolsacretos o enrocados, considerando que dichos elementos se adaptan a la dinámica propia de este tipo de corrientes y al material de cimentación. A causa de la dificultad de disponer de estos materiales en la zona, se optó por una estructura tipo escalonada de concreto, rígida. El empalme entre el cauce natural y la estructura de disipación se ha previsto utilizando material pétreo debidamente dispuesto.

El diseño de la estructura escalonada se ha definido a partir de la selección de las dimensiones de la huella y contrahuella más adecuadas, tomando en cuenta el perfil del terreno y la metodología propuesta por Ohtsu, Yasuda y Takahashi (2004). Esta metodología permite evaluar las dimensiones de los escalones para asegurar las condiciones del flujo rasante más apropiadas y para la máxima disipación de energía.

## DIMENSIONES DE LOS ESCALONES

Con base en las consideraciones planteadas en el párrafo anterior, a continuación se presenta un resumen de las magnitudes de las variables utilizadas en el dimensionamiento de la estructura escalonada. Las dimensiones definitivas se obtuvieron a partir de un proceso de ensayo y error que permitió analizar distintas combinaciones de pendiente, valores de huella y contrahuella, para garantizar, de acuerdo con la metodología de flujo rasante, una disipación adecuada de energía. En este análisis también se consideraron las limitaciones propias del proceso constructivo de la estructura.

**Tabla 1**

Diseño de la estructura escalonada de flujo rasante para el Caño Piedras. Parámetros de diseño y dimensiones. Metodología Ohtsu, Yasuda y Takahashi (2004)

|               |       |                   |   |
|---------------|-------|-------------------|---|
| $H_{total} =$ | 2.17  | m                 | Altura de caída, desnivel                         |
| $Q =$         | 55.10 | m <sup>3</sup> /s | Caudal de diseño                                  |
| $B =$         | 8.0   | m                 | Ancho canal de aproximación                       |
| $\theta =$    | 8.13  | °                 | Angulo del seudofondo (acomodar según topografía) |
| $g =$         | 9.81  | m/s <sup>2</sup>  | Aceleración de la gravedad                        |

| Canal con Flujo Rasante    |         |        |  |                           |
|----------------------------|---------|--------|--|---------------------------|
| Variable                   | Símbolo | Unidad | Expresión Usada  | Cálculo                   |
| Altura del escalón         | S       | m      | De Tabla 9.1 (interpolado)   | <b>0.30</b>               |
| Profundidad crítica        | $y_c$   | m      | $y_c = \left[ \frac{(Q)^2}{g} \right]^{1/3}$                                     | <b>1.69</b>               |
| Condición de flujo rasante |         |        | $\left[ \frac{S}{y_c} \right]_s = \frac{7}{6} [\tan(\theta)]^{1/6}$              | <b>0.84</b><br>OK         |
| Tipo de flujo              | ---     | ---    | Si $\theta > 19^\circ$   | <b>NO</b>                 |
|                            | ---     | ---    | $\frac{S}{y_c} \leq \left[ \frac{g}{y_c} \right]_B$                              | No                        |
|                            | ---     | ---    |  |                           |
|                            | ---     | ---    | $\left[ \frac{S}{y_c} \right]_B = [13(\tan\theta)^2 - 2.73(\tan\theta)] + 0.373$ | <b>0.25</b>               |
|                            | ---     | ---    | Flujo tipo B (otros casos)   | No                        |
|                            | ---     | ---    | Flujo tipo A   | <b>El flujo es tipo A</b> |
|                            | ---     | ---    | Flujo tipo B   | No                        |

|                  |  |     |   |                   |
|------------------|--|-----|---|-------------------|
| Energía residual | $\left( \frac{E_{res}}{y_c} \right)_u$ | m/m | Para Flujo Tipo A<br>$\left( \frac{f}{8\text{sen}\theta} \right)^{(1/3)} \cos\theta + \frac{1}{2} \left( \frac{f}{8\text{sen}\theta} \right)^{(-2/3)}$<br>Para Flujo Tipo B<br>$\left( \frac{f}{8\text{sen}\theta} \right)^{(1/3)} + \frac{1}{2} \left( \frac{f}{8\text{sen}\theta} \right)^{(-2/3)}$ | <b>2.86</b>       |
|                  | $E_{res\_cub-sinforme}$                | m   | Para $5.7^\circ \leq \theta \leq 19^\circ$<br>$D=0.300$<br>Para $19^\circ \leq \theta \leq 55^\circ$<br>$E_{res} = 2.86 * y_c$  | <b>4.83</b>       |
|                  | $E_{res\_NOcub-sinforme}$              | m   | $5.0 \leq \frac{H_{Total}}{y_c} \leq \frac{H_e}{y_c}$<br>$\frac{E_{res}}{y_c} = 1.5 + \left[ \left( \frac{E_{res}}{y_c} \right)_u - 1.5 \right] \left[ 1 - \left( 1 - \frac{H_{Total}}{H_e} \right)^{0.25+4} \right]$   | OK<br><b>2.06</b> |

**CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LA ESTRUCTURA. DIMENSIONES**

A continuación se presenta un resumen de las consideraciones de diseño que han permitido establecer las dimensiones de varios elementos de la estructura, diferentes de su huella y contrahuella.

A renglón seguido es posible observar la estructura de entrega del Caño Piedras para una sección transversal rectangular de 8,00 m de ancho, con una altura de escalón de 0,3 m, una huella de 2,10 m y un escalón

final de 0,37 m de contrahuella, que permite el remate en un tanque de amortiguamiento. A continuación se presentan las dimensiones descritas de la estructura (figura 2).

Teniendo en cuenta las características del material aluvial sobre el cual está cimentada la estructura, se definieron juntas de construcción para asegurar que, ante posibles desplazamientos, la estructura se mantenga impermeable.

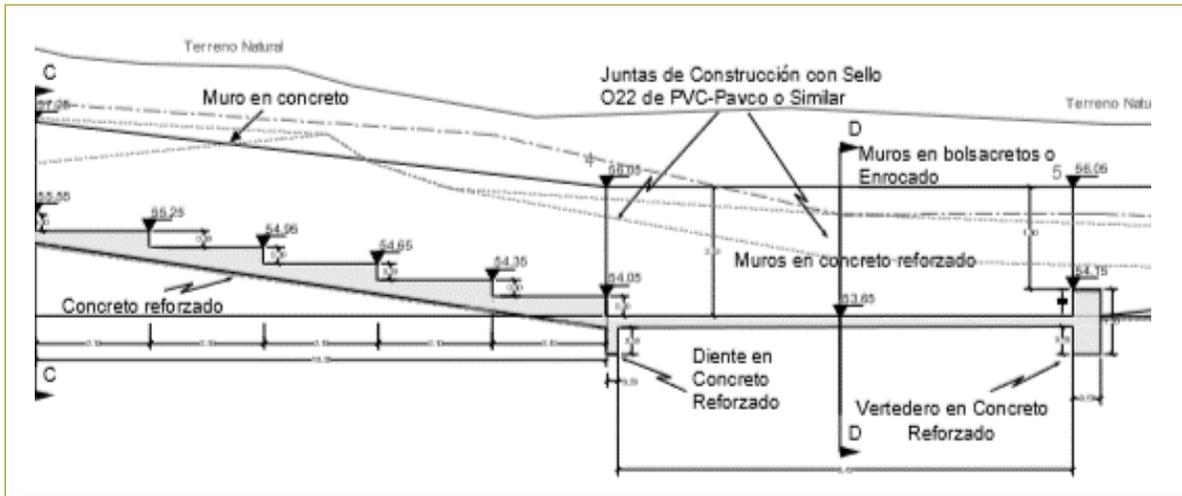


Figura 2. Perfil longitudinal de la estructura de disipación. Caño Piedras.

### Tanque de amortiguamiento

Con el propósito de disipar la energía residual aguas abajo de la estructura, hubo necesidad de diseñar un tanque de amortiguamiento para asegurar condiciones de flujo subcrítico en la entrega al canal de realineamiento. La formación del resalto hidráulico dentro del tanque se garantiza mediante un vertedero frontal. A continuación se presenta un esquema general del tanque propuesto (figura 3).

En virtud de que estas estructuras de disipación están sujetas a permanentes esfuerzos de impacto y a flujos secundarios, se proyectaron dos elementos de anclaje de 0,5 m de altura, ubicados bajo la placa.

### Muros laterales

La altura de los muros de la estructura escalonada y el tanque de amortiguamiento se definieron con base en la lámina de agua máxima obtenida de los diferentes análisis. Tomando en cuenta el aire contenido en el flujo rasante, se ha definido una altura de los muros laterales, considerando la lámina de agua con un 40 % adicional a la altura estimada.

Además, para la altura definitiva de los muros se tuvieron presentes las características topográficas de la zona, de tal manera que se genere una transición entre la estructura y el terreno natural.

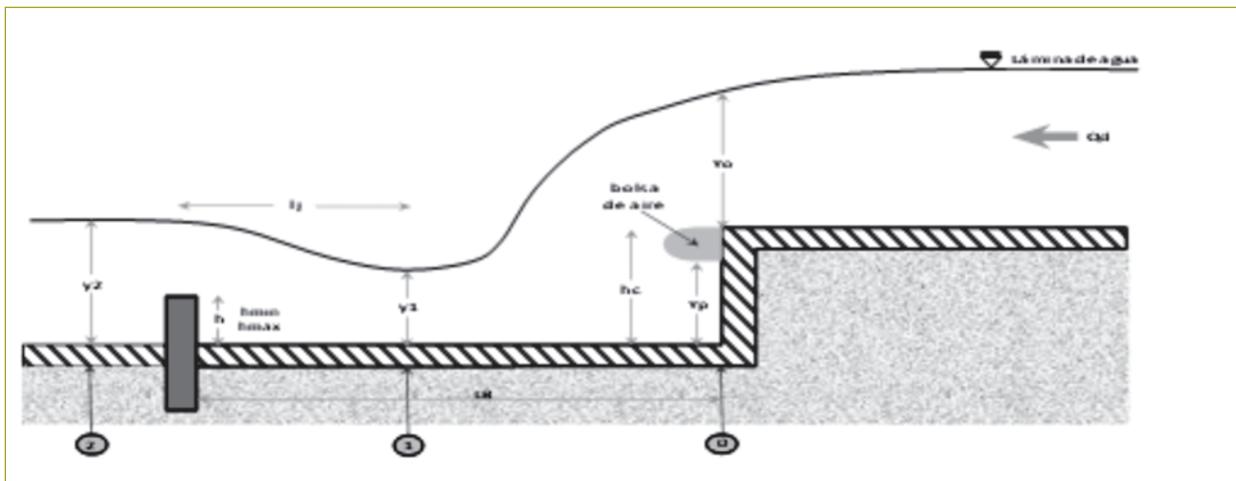


Figura 3. Esquema general de un tanque disipador de energía con resalto hidráulico.

A lo largo de la estructura de disipación y del tanque de amortiguamiento, se proyectaron muros en concreto reforzado.

Finalmente, es necesario “peinar” los taludes del valle actual con ayuda de material enrocado, con una pendiente recomendada de 2H: 1V.

**Transiciones**

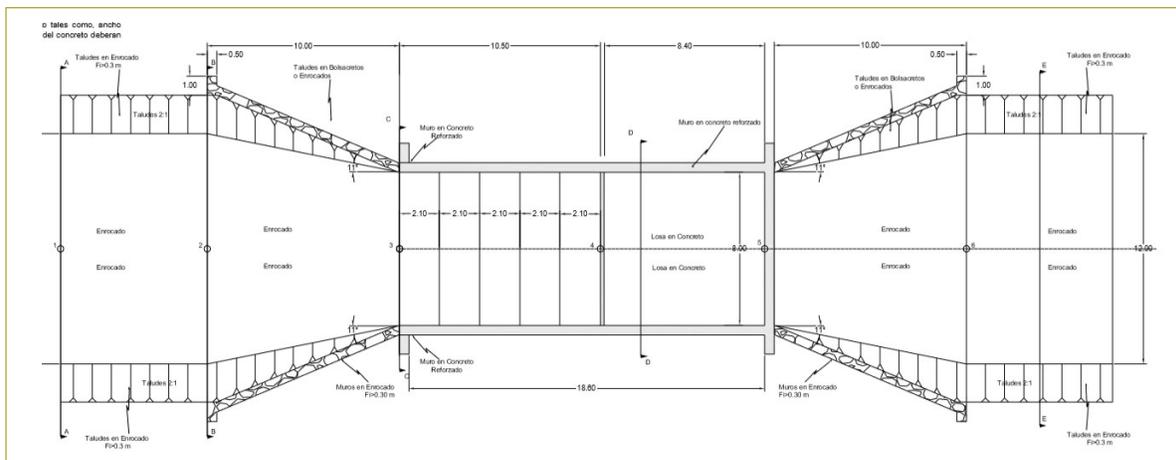
Considerando que las estructuras escalonadas no tienen el mismo ancho de la sección transversal de la corriente, fue necesario proyectar transiciones entre la sección original del cauce y la estructura de entrega tanto a la entrada como a la salida.

Esta transición se definió con muros 2H: 1V en enrocado y bolsacretos o gaviones, por facilidad de construcción, lo que permite una mejor adaptación a las condiciones dinámicas de las corrientes.

Con el propósito de crear una mayor estabilidad, se diseñaron dos dientes laterales en cada uno de los extremos de los muros, para crear un anclaje adicional que ayude a soportar los altos esfuerzos cortantes que pueden desestabilizar la estructura.

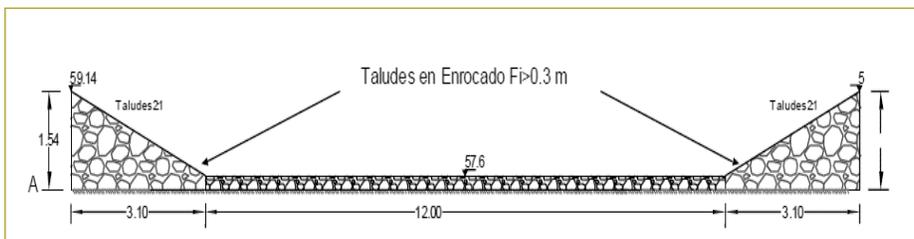
A renglón seguido se presenta la vista en planta de la estructura definitiva, tomando en cuenta las anteriores consideraciones (figura 4).

Igualmente, se muestran las secciones transversales de la estructura escalonada, de las transiciones y del tanque de amortiguamiento aguas abajo de la estructura (figuras 5, 6, 7 y 8).

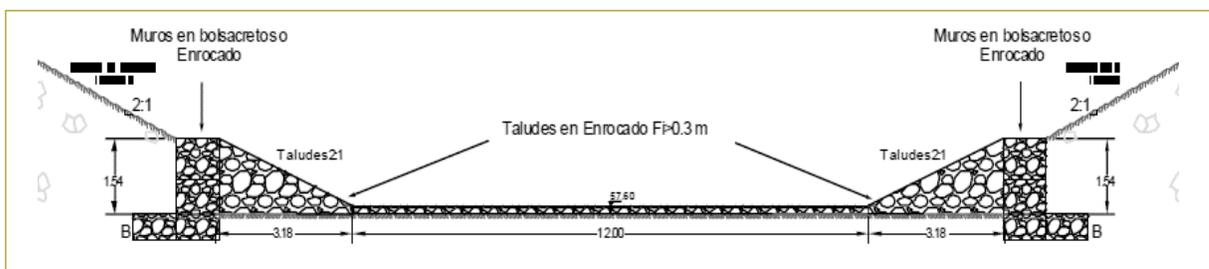


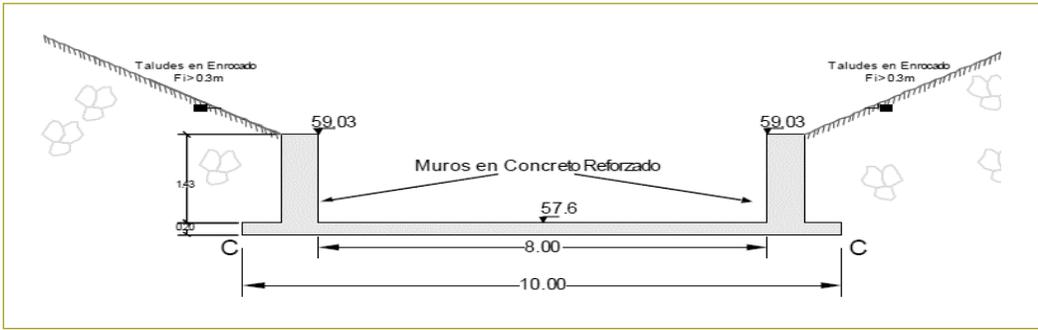
**Figura 4.** Vista en planta de la estructura de disipación de energía del Caño Piedras.

**Figura 5.** Sección transversal aguas arriba de la estructura de disipación de energía del Caño Piedras. Corte A-A.



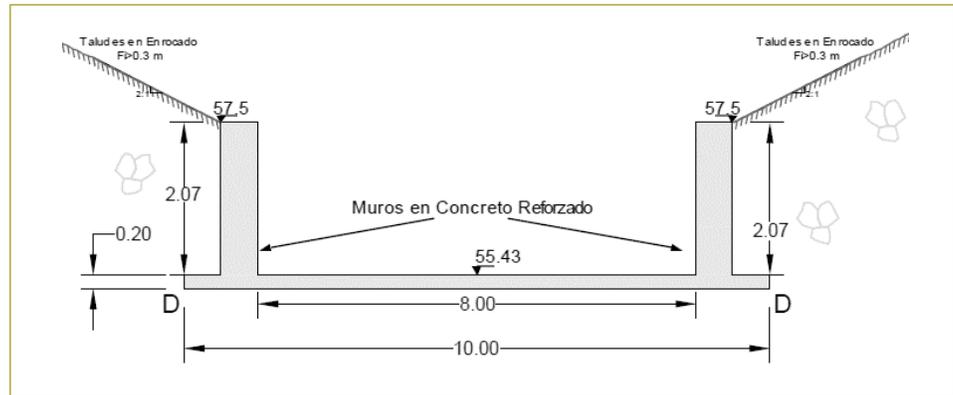
**Figura 6.** Sección transversal al inicio de la estructura de disipación de energía del Caño Piedras. Corte B-B.





**Figura 7.** Sección transversal típica en la estructura de dissipación de energía del Caño Piedras. Corte C-C.

**Figura 8.** Sección transversal en el tanque amortiguador aguas abajo de la estructura de dissipación de energía del Caño Piedras. Corte D-D.



## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Para superar una diferencia de altura en un tramo muy corto en la descarga del Caño Piedras al canal de realineamiento del arroyo San Antonio, se proyectó una estructura tipo escalonada, con flujo rasante y un tanque de amortiguamiento en concreto reforzado. Este sistema permite disipar en forma adecuada la energía cinética adicionada al flujo, debido a la fuerte pendiente del cauce. Lateralmente, se ha proyectado un recubrimiento con enrocado, de modo que la obra se adapte a las condiciones topográficas existentes. Como opción se ha propuesto construir esta estructura con bolsacretos y piedra pegada, con el fin de disponer de una estructura un poco más flexible.

Desde el punto de vista de las condiciones de flujo se proyectó una estructura escalonada muy corta, asumiendo que al final de esta se obtienen condiciones de flujo uniforme, correspondiente a la mezcla de agua y

aire, con lo cual es necesario su remate mediante un tanque de amortiguamiento.

La ubicación de la estructura se hizo teniendo en cuenta el alineamiento natural de la corriente y conservando los puntos bajos de la corriente de tal manera que se puedan reducir los movimientos de tierra.

## REFERENCIAS

- Centro de Estudios Hidráulicos (2016). *Consultoría para el diseño del realineamiento # 4 y factibilidad del realineamiento definitivo del arroyo San Antonio, en el departamento del Cesar*. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería.
- González, C. & Chanson, H. (2007). *Diseño hidráulico de verederos escalonados con pendientes moderadas: metodología basada en un estudio experimental*. Brisbane: Universidad de Queensland.
- Ohtsu, I., Yasuda, Y. & Takahashi, M. (2004, septiembre). Flow characteristics of skimming flows in stepped channels. *Journal of Hydraulic Engineering*, 130(9), 860-869.



# Opciones para mitigar la escasez de agua potable en Colombia

## Options to mitigate drinking water scarcity in Colombia

LUIS GABRIEL ANGARITA TORRES<sup>1</sup> - JAIRO ALBERTO ROMERO ROJAS<sup>2</sup>

1. Ingeniero agrícola de la Universidad Nacional de Colombia. Máster en Ingeniería Civil con énfasis en Recursos Hidráulicos y Medio Ambiente de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

2. Ingeniero civil de la Universidad Nacional de Colombia. MEEE. Profesor titular de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

luis.angarita-t@mail.escuelaing.edu.co - jairo.romero@escuelaing.edu.co

Recibido: 17/01/2021 Aceptado: 20/02/2021

Disponible en [http://www.escuelaing.edu.co/es/publicaciones\\_revista](http://www.escuelaing.edu.co/es/publicaciones_revista)  
<http://revistas.escuelaing.edu.co/index.php/reci>

### Resumen

En este artículo se identifican las opciones para mitigar la escasez de agua potable en Colombia. Para tal fin, en primer lugar se mencionan los municipios que ante condiciones hidrológicas promedio y condiciones hidrológicas secas cuentan con un índice de vulnerabilidad al desabastecimiento hídrico (IVH, por su sigla en inglés) que varía entre valores medio, alto y muy alto.

A continuación se presentan las principales causas de escasez de agua potable en dichos municipios, entre las que sobresalen la deforestación, el verano intenso, la contaminación de las fuentes de agua y la falta de inversión.

Finalmente, se identifican soluciones que permitan enfrentar cada una de las causas que generan la escasez de agua potable [1].

**Palabras claves:** agua potable, escasez, condiciones hidrológicas, índice de vulnerabilidad al desabastecimiento hídrico, municipios.

### Abstract

This article identifies the options to mitigate drinking water scarcity in Colombia.

First, municipalities that under average hydrological conditions and dry hydrological conditions, have a Water Vulnerability Index that varies between medium, high, and very high values are mentioned.

Then, the main causes of drinking water shortage in these municipalities are shown, establishing that deforestation, intense summer, water sources pollution, and lack of investment are the causes of this problem. Finally, solutions are identified to confront each of the causes that generate the scarcity of drinking water [1].

**Keywords:** drinking water, shortage, hydrological conditions, water vulnerability index, municipalities.

## INTRODUCCIÓN

Colombia, gracias a su ubicación geográfica, cuenta con el privilegio de poseer un clima y un territorio rico en fuentes hídricas que le permiten tener una disponibilidad anual de agua por habitante de  $33.160 \text{ m}^3$  (cuarto en el mundo), valor muy superior a aquel en que se considera que empieza la escasez,  $<1700 \text{ m}^3/\text{persona}$ . año. Esta riqueza hídrica abarca fuentes de agua de tipo superficial y subterránea que, a pesar de repartirse homogéneamente en la mayoría del país, no llega a todos los habitantes por carencia de infraestructura o de presión en la demanda, en sus zonas más densamente pobladas [2].

Tres aspectos reúnen las causas que limitan el desarrollo y el bienestar de parte de las poblaciones que se asientan en las zonas críticas de escasez de agua [3]:

- Escasez de agua por ausencia física o por calidad.
- Escasez de agua por falta de infraestructura.
- Escasez de agua por dificultades organizacionales.

El primero de estos aspectos engloba las siguientes causas: incremento en la demanda de alimentos, crecimiento urbano, crecimiento industrial, producción de biocombustibles, aumento de los efectos del calentamiento global y deterioro en la calidad del agua.

La escasez de agua, asociada a la falta de infraestructura y a la imposibilidad de establecer y mantener organizaciones que gestionen el uso de este recurso vital, alcanza un nivel de importancia medio, supeditado a la falta de recursos económicos, a limitaciones técnicas y a la ausencia de entes rectores de las políticas para la administración del recurso.

Las iniciativas para mitigar la escasez se agrupan en los siguientes ejes: gestión del suministro y gestión de la demanda. La primera de estas opciones implica desarrollar nuevas infraestructuras de captación y distribución, aumento de almacenamiento, control de contaminación, aprovechamiento de agua subterránea, y reciclaje y reutilización de agua, entre otras [4]. La gestión de la demanda se define como un conjunto de acciones que controlan la demanda, bien aumentando la eficiencia económica general del uso del agua

como recurso natural, o bien reasignando los recursos hídricos dentro de cada sector y entre los distintos sectores [4].

Considerando la magnitud del escenario, enfrentar la escasez de agua se convierte en una prioridad a escala global, puesto que de esta batalla dependerán la seguridad energética, la seguridad alimentaria, el crecimiento económico, la reducción de los conflictos, la pérdida de la biodiversidad y la adaptación al cambio climático.

## RESULTADOS

### Municipios con escasez de agua potable en el país

En el marco del Estudio Nacional del Agua (ENA, 2014) [5] se sometieron a análisis 318 fuentes hídricas que proveen del preciado líquido a cabeceras municipales que presentan problemas de abastecimiento. A partir de allí se calculó el índice de vulnerabilidad al desabastecimiento hídrico (IVH, por su sigla en inglés), que determina el grado de fragilidad de la cuenca hidrográfica para mantener una oferta para el abastecimiento de agua ante fenómenos climatológicos. Este estudio se realizó en dos escenarios: condiciones hidrológicas promedio y condiciones hidrológicas secas.

A continuación (tablas 1 a 5) se incluyen, para cada cabecera municipal, la fuente correspondiente; la demanda hídrica anual; el índice de retención y regulación hídrica (IRH), que mide la cantidad de humedad que pueden retener las cuencas; la oferta anual; el índice de uso de agua (IUA), que corresponde a la cantidad de agua utilizada por los usuarios durante un periodo y para una cuenca determinada, en relación con la oferta hídrica disponible para los mismos espacio y tiempo, y la calificación para el índice de vulnerabilidad al desabastecimiento hídrico (IVH).

### Condiciones hidrológicas promedio

En este escenario, el estudio arroja que ocho cabeceras municipales del país presentan vulnerabilidad alta (tabla 1) y 53 cabeceras registran vulnerabilidad media (tabla 2).

**Tabla 1**  
Municipios con IVH alto en condiciones hidrológicas promedio (5)

| DEPARTAMENTO       | CABECERA MUNICIPAL | NOMBRE FUENTE   | DEMANDA HÍDRICA ANUAL 2014 (MILLONES DE METROS CÚBICOS) | IRH CAT. | CONDICIONES HIDROLÓGICAS MEDIAS        |   |          |          |
|--------------------|--------------------|---|---|----------|--|---|----------|----------|
|                    |                    |   |   |          | OFERTA ANUAL (MILES DE METROS CÚBICOS) | OFERTA ANUAL DISPONIBLE (MILES DE METROS CÚBICOS) | IUA CAT. | IVH CAT. |
| BOYACA             | FLORESTA           | QDA. TENERIA  | 0,102   | BAJO     | 0,32                                   | 0,27  | ALTO     | ALTO     |
| BOYACA             | PAIPA              | QDAS. TOIBITA Y EL CAIMAN Y NACEDERO EL PORVENIR      | 1,234   | BAJO     | 12,27                                  | 9,31  | MODERADO | ALTO     |
| BOYACA             | SORACÁ             | QDA. SALITRE Y NACEDERO EL VIEJO                      | 0,04  | BAJO     | 0,38                                   | 0,27  | MODERADO | ALTO     |
| CUNDINAMARCA       | SIBATÉ             | RÍO AGUAS CLARAS                                      | 1,264   | BAJO     | 15,74                                  | 8,25  | MODERADO | ALTO     |
| MAGDALENA          | SANTA MARTA        | RÍOS MANZANARES, PIEDRAS Y GAIRA                      | 21,976  | BAJO     | 281,03                                 | 199,49  | MODERADO | ALTO     |
| NARIÑO             | PASTO              | RÍO PASTO, EMBALSE RIO BOBO Y QDAS. CHAPAL Y MIJITAYO | 18,515  | BAJO     | 63,6                                   | 32,26   | MUY ALTO | ALTO     |
| NORTE DE SANTANDER | PAMPLONA           | QDAS. CARIONGO, EL ROSAL Y EL MONO                    | 2,777   | MODERADO | 23,09                                  | 13,08   | ALTO     | ALTO     |
| VALLE DEL CAUCA    | YUMBO              | RÍO YUMBO   | 7,767   | MODERADO | 21,33                                  | 13,01   | MUY ALTO | ALTO     |

**Tabla 2**  
Municipios con IVH medio en condiciones hidrológicas promedio (5)

| DEPARTAMENTO | CABECERA MUNICIPAL | NOMBRE FUENTE                    | DEMANDA HÍDRICA ANUAL 2014 (MILLONES DE METROS CÚBICOS) | IRH CAT. | CONDICIONES HIDROLÓGICAS MEDIAS        |   |          |          |
|--------------|--------------------|----------------------------------|---|----------|--|---|----------|----------|
|              |                    |                                  |   |          | OFERTA ANUAL (MILES DE METROS CÚBICOS) | OFERTA ANUAL DISPONIBLE (MILES DE METROS CÚBICOS) | IUA CAT. | IVH CAT. |
| ANTIOQUIA    | SALGAR             | QDA. LA SUCRE                    | 0,502   | ALTO     | 7,12                                   | 4,1   | MODERADO | MEDIO    |
| ANTIOQUIA    | EL SANTUARIO       | QDAS. EL SALTO Y BODEGAS         | 0,944   | MODERADO | 10,22                                  | 6,19  | MODERADO | MEDIO    |
| BOYACA       | CHIQUINQUIRÁ       | RÍO SUÁREZ                       | 3,679   | MUY BAJO | 312,21                                 | 221,59  | BAJO     | MEDIO    |
| BOYACA       | CIÉNEGA            | QDA. EL GUAMO                    | 0,071   | BAJO     | 5,34                                   | 3,86  | BAJO     | MEDIO    |
| BOYACA       | GARAGOA            | QDAS. LAS MOYAS Y HATILLOS       | 0,742   | BAJO     | 58,66                                  | 43,25   | BAJO     | MEDIO    |
| BOYACA       | LA CAPILLA         | QDA. LA GUAYA                    | 0,053   | BAJO     | 52,65                                  | 33,23   | MUY BAJO | MEDIO    |
| BOYACA       | MIRAFLORES         | LAG. EL RAMO Y QDA. LA JORDANERA | 0,448   | BAJO     | 49,83                                  | 37,1  | BAJO     | MEDIO    |
| BOYACA       | MONGUA             | RÍO LEONERA Y QDA. PEÑABLANCA    | 0,089   | BAJO     | 39,25                                  | 32,71   | MUY BAJO | MEDIO    |
| BOYACA       | MONGUÍ             | RÍO MORRO                        | 0,189   | BAJO     | 28,93                                  | 24,11   | MUY BAJO | MEDIO    |
| BOYACA       | MONIQUIRÁ          | QDA. LA SICHA                    | 0,971   | BAJO     | 338,14                                 | 209,4   | MUY BAJO | MEDIO    |

**Tabla 2**  
Municipios con IVH medio en condiciones hidrológicas promedio (5)

| DEPARTAMENTO | CABECERA MUNICIPAL | NOMBRE FUENTE                            | DEMANDA HÍDRICA ANUAL 2014 (MILLONES DE METROS CÚBICOS) | IRH CAT. | CONDICIONES HIDROLÓGICAS MEDIAS        |   |          |          |
|--------------|--------------------|--|---|----------|--|---|----------|----------|
|              |                    |  |   |          | OFERTA ANUAL (MILES DE METROS CÚBICOS) | OFERTA ANUAL DISPONIBLE (MILES DE METROS CÚBICOS) | IUA CAT. | IVH CAT. |
| CUNDINAMARCA | BITUIMA            | RÍO CONTADOR Y QDAS. EL SILENCIO Y GUATE | 0,035   | BAJO     | 101,84                                 | 78,3  | MUY BAJO | MEDIO    |
| CUNDINAMARCA | EL COLEGIO         | QDA. SANTA MARTA                         | 0,644   | BAJO     | 35,41                                  | 18,56   | BAJO     | MEDIO    |
| CUNDINAMARCA | GACHALÁ            | QDAS. LOS ANDES, LA MOYA Y BELLAVISTA    | 0,106   | BAJO     | 30,62                                  | 21,27   | MUY BAJO | MEDIO    |
| CUNDINAMARCA | GUASCA             | RÍO CHIPATA Y QDA. EL UVAL               | 0,353   | BAJO     | 52,75                                  | 27,65   | BAJO     | MEDIO    |
| CUNDINAMARCA | GUATAVITA          | RÍO CORALES Y QDA. EL CHUSCAL            | 0,17  | BAJO     | 5,27                                   | 2,78  | BAJO     | MEDIO    |
| CUNDINAMARCA | JERUSALÉN          | QDA. EL TABACO                           | 0,051   | BAJO     | 4,97                                   | 4,31  | BAJO     | MEDIO    |
| CUNDINAMARCA | NOCAIMA            | QDAS. NATAUTA Y EL TIGRE                 | 0,096   | BAJO     | 56,47                                  | 34,77   | MUY BAJO | MEDIO    |
| CUNDINAMARCA | PANDI              | QDA. GRANDE                              | 0,056   | BAJO     | 8,88                                   | 4,27  | BAJO     | MEDIO    |
| CUNDINAMARCA | QUEBRADANEGRA      | QDAS. AGUA CLARA Y LA CHORRERA           | 0,013   | BAJO     | 14,02                                  | 8,69  | MUY BAJO | MEDIO    |
| CUNDINAMARCA | SILVANIA           | RIO BLANCO                               | 0,388   | BAJO     | 96,57                                  | 66,99   | MUY BAJO | MEDIO    |
| CUNDINAMARCA | SUBACHOQUE         | RÍO SUBACHOQUE Y QDA. LA COLORADA        | 0,382   | BAJO     | 8,95                                   | 5,42  | BAJO     | MEDIO    |
| CUNDINAMARCA | VIANÍ              | RÍO CONTADOR Y QDA. LA PEÑA              | 0,089   | BAJO     | 92,75                                  | 57,11   | MUY BAJO | MEDIO    |
| CUNDINAMARCA | VILLETA            | RÍO NAMAY Y QDA. CUNE                    | 1,171   | BAJO     | 50,36                                  | 38,72   | BAJO     | MEDIO    |
| CUNDINAMARCA | VIOTÁ              | RÍO LINDO Y LAGUNA DEL INDIO             | 0,294   | BAJO     | 194,09                                 | 101,62  | MUY BAJO | MEDIO    |
| HUILA        | NEIVA              | RÍO CEIBAS                               | 11,659  | ALTO     | 157,04                                 | 87,77   | MODERADO | MEDIO    |
| LA GUAJIRA   | MAICAO             | RÍO CARRAIPA                             | 2,756   | MUY BAJO | 30,01                                  | 28,28   | BAJO     | MEDIO    |

**Tabla 2**  
Municipios con IVH medio en condiciones hidrológicas promedio (5)

| DEPARTAMENTO       | CABECERA MUNICIPAL | NOMBRE FUENTE   | DEMANDA HÍDRICA ANUAL 2014 (MILLONES DE METROS CÚBICOS) | IRH CAT. | CONDICIONES HIDROLÓGICAS MEDIAS        |   |          |          |
|--------------------|--------------------|---|---|----------|--|---|----------|----------|
|                    |                    |   |   |          | OFERTA ANUAL (MILES DE METROS CÚBICOS) | OFERTA ANUAL DISPONIBLE (MILES DE METROS CÚBICOS) | IJA CAT. | IVH CAT. |
| NARIÑO             | SAN LORENZO        | QDAS. LA CHORRERA Y LA PALMA                                      | 0,128   | MODERADO | 1,22                                   | 0,66  | MODERADO | MEDIO    |
| NORTE DE SANTANDER | CONVENCIÓN         | QDAS. EL GUAMAL Y SAN JUAN  | 0,343   | BAJO     | 44,27                                  | 26,93   | BAJO     | MEDIO    |
| NORTE DE SANTANDER | SAN CALIXTO        | QDA. LA MARAVILLA   | 0,102   | BAJO     | 11,83                                  | 7,22  | BAJO     | MEDIO    |
| NORTE DE SANTANDER | TIBÚ               | RÍO TIBU  | 0,958   | BAJO     | 754,93                                 | 488,7   | MUY BAJO | MEDIO    |
| NORTE DE SANTANDER | VILLA DEL ROSARIO  | RÍO TÁCHIRA   | 6,099   | BAJO     | 347,48                                 | 240,38  | BAJO     | MEDIO    |
| RISARALDA          | PEREIRA            | RÍO OTÚN  | 27,878  | ALTO     | 393,06                                 | 214,29  | MODERADO | MEDIO    |
| RISARALDA          | MISTRATÓ           | QDA. ARRAYANAL  | 0,263   | MODERADO | 4,41                                   | 2,42  | MODERADO | MEDIO    |
| SANTANDER          | BUCARAMANGA        | ACUEDUCTO METROPOLITANO DE BUCARAMANGA (RÍOS TONA, FRÍO Y SURATA) | 44,716  | ALTO     | 330,83                                 | 211,21  | ALTO     | MEDIO    |
| SANTANDER          | BOLÍVAR            | QDAS. LA HERVEDORA Y POZO VERDE                                   | 0,067   | BAJO     | 71,17                                  | 44,08   | MUY BAJO | MEDIO    |
| SANTANDER          | CHIPATÁ            | QDA. LA GILERIA   | 0,036   | BAJO     | 23,61                                  | 14,62   | MUY BAJO | MEDIO    |
| SANTANDER          | MÁLAGA             | QDAS. LA MAGNOLIA Y LOS MOLINOS                                   | 1,122   | MODERADO | 9,4                                    | 6,01  | MODERADO | MEDIO    |
| TOLIMA             | IBAGUÉ             | RÍO COMBEIMA Y QDA. CAY   | 42,11   | ALTO     | 182,35                                 | 96,79   | ALTO     | MEDIO    |
| TOLIMA             | COYAIMA            | RÍOS SALDAÑA Y MECHE  | 0,317   | MUY BAJO | 7482,97                                | 3640,36   | MUY BAJO | MEDIO    |
| TOLIMA             | MELGAR             | RÍO SUMAPAZ Y QDA. LA MELGARA                                     | 2,996   | BAJO     | 1426,5                                 | 918,54  | MUY BAJO | MEDIO    |
| TOLIMA             | NATAGAIMA          | RÍO ANCHIQUE  | 1,1   | MUY BAJO | 546,79                                 | 465,66  | MUY BAJO | MEDIO    |
| VALLE DEL CAUCA    | CALI               | RÍOS CAUCA, CALI Y MELENDEZ                                       | 196,277   | BAJO     | 6176,68                                | 3767,09   | BAJO     | MEDIO    |
| VALLE DEL CAUCA    | BUGA               | RÍO GUADALAJARA   | 8,891   | MODERADO | 132,53                                 | 73,55   | MODERADO | MEDIO    |
| VALLE DEL CAUCA    | PALMIRA            | RÍO NIMA  | 19,386  | MODERADO | 201,41                                 | 126,29  | MODERADO | MEDIO    |

### Condiciones hidrológicas secas

En estas condiciones, se puede observar que dos cabeceras municipales presentan vulnerabilidad muy alta (tabla 3), 27 cabeceras municipales tienen vulnerabilidad alta (tabla 4) y 42 cabeceras municipales registran vulnerabilidad media (tabla 5).

**Tabla 3**  
Municipios con IVH muy alto en condiciones hidrológicas secas (5)

| DEPARTAMENTO | CABECERA MUNICIPAL | NOMBRE FUENTE | DEMANDA HÍDRICA ANUAL 2014 (MILLONES DE METROS CÚBICOS) | IRH CAT. | CONDICIONES HIDROLÓGICAS SECAS         |   |          |          |
|--------------|--------------------|---------------|---|----------|--|---|----------|----------|
|              |                    |               |   |          | OFERTA ANUAL (MILES DE METROS CÚBICOS) | OFERTA ANUAL DISPONIBLE (MILES DE METROS CÚBICOS) | IUA CAT. | IVH CAT. |
| BOYACA       | CHIQUINQUIRÁ       | RÍO SUÁREZ    | 3,679   | MUY BAJO | 3,78                                   | 2,69  | MUY ALTO | MUY ALTO |
| LA GUAJIRA   | MAICAO             | RÍO CARRAIPA  | 2,756   | MUY BAJO | 0,47                                   | 0,45  | MUY ALTO | MUY ALTO |

**Tabla 4**  
Municipios con IVH alto en condiciones hidrológicas secas (5)

| DEPARTAMENTO | CABECERA MUNICIPAL    | NOMBRE FUENTE                                    | DEMANDA HÍDRICA ANUAL 2014 (MILLONES DE METROS CÚBICOS) | IRH CAT. | CONDICIONES HIDROLÓGICAS SECAS         |   |          |          |
|--------------|-----------------------|--|---|----------|--|---|----------|----------|
|              |                       |  |   |          | OFERTA ANUAL (MILES DE METROS CÚBICOS) | OFERTA ANUAL DISPONIBLE (MILES DE METROS CÚBICOS) | IUA CAT. | IVH CAT. |
| ANTIOQUIA    | EL SANTUARIO          | QDAS. EL SALTO Y BODEGAS                         | 0,944   | MODERADO | 4,03                                   | 2,44  | ALTO     | ALTO     |
| BOYACA       | FLORESTA              | QDA. TENERIA                                     | 0,102   | BAJO     | 0,18                                   | 0,15  | MUY ALTO | ALTO     |
| BOYACA       | OICATA                | QDA. LA MECHA                                    | 0,016   | BAJO     | 0,19                                   | 0,12  | MODERADO | ALTO     |
| BOYACA       | PAIPA                 | QDAS. TOIBITA Y EL CAIMAN Y NACEDERO EL PORVENIR | 1,234   | BAJO     | 1,9                                    | 1,44  | MUY ALTO | ALTO     |
| BOYACA       | SANTA ROSA DE VITERBO | QDA. GRANDE Y UN NACEDERO                        | 0,451   | BAJO     | 1,81                                   | 1,37  | ALTO     | ALTO     |
| BOYACA       | SORACA                | QDA. SALITRE Y NACEDERO EL VIEJO                 | 0,04  | BAJO     | 0,05                                   | 0,04  | MUY ALTO | ALTO     |
| BOYACA       | TOCA                  | RIO TOCA   | 0,292   | BAJO     | 2,52                                   | 1,79  | MODERADO | ALTO     |
| CESAR        | VALLEDUPAR            | RIOS GUATAPURI Y BADILLO                         | 17,931  | BAJO     | 151,53                                 | 93,15   | MODERADO | ALTO     |
| CESAR        | EL COPEY              | RIO ARIGUANICITO                                 | 1,044   | BAJO     | 13                                     | 8,56  | MODERADO | ALTO     |

**Tabla 4**  
Municipios con IVH alto en condiciones hidrológicas secas (5)

| DEPARTAMENTO       | CABECERA MUNICIPAL  | NOMBRE FUENTE   | DEMANDA HÍDRICA ANUAL 2014 (MILLONES DE METROS CÚBICOS) | IRH CAT. | CONDICIONES HIDROLÓGICAS SECAS         |   |          |          |
|--------------------|---------------------|---|---|----------|--|---|----------|----------|
|                    |                     |   |   |          | OFERTA ANUAL (MILES DE METROS CÚBICOS) | OFERTA ANUAL DISPONIBLE (MILES DE METROS CÚBICOS) | IUA CAT. | IVH CAT. |
| CESAR              | LA JAGUA DE IBIRICO | RIO SORORIA   | 1,586   | MUY BAJO | 6,1                                    | 4,83  | ALTO     | ALTO     |
| CUNDINAMARCA       | EL COLEGIO          | QDA. SANTA MARTA                                      | 0,644   | BAJO     | 4,98                                   | 2,61  | ALTO     | ALTO     |
| CUNDINAMARCA       | GUATAVITA           | RIO CORALES Y QDA. EL CHUSCAL                         | 0,17  | BAJO     | 2,78                                   | 1,46  | MODERADO | ALTO     |
| CUNDINAMARCA       | SIBATE              | RIO AGUAS CLARAS                                      | 1,264   | BAJO     | 10,84                                  | 5,68  | ALTO     | ALTO     |
| CUNDINAMARCA       | TOPIAPI             | QDA. SUCONAL  | 0,042   | MODERADO | 0,29                                   | 0,17  | ALTO     | ALTO     |
| CUNDINAMARCA       | VILLETA             | RIO NAMAY Y QDA. CUNE                                 | 1,171   | BAJO     | 14,76                                  | 11,35   | MODERADO | ALTO     |
| CUNDINAMARCA       | YACOPI              | QDAS. AGUA BLANCA Y EL VALLE                          | 0,241   | MODERADO | 1,3                                    | 0,83  | ALTO     | ALTO     |
| MAGDALENA          | SANTA MARTA         | RIOS MANZANARES, PIEDRAS Y GAIRA                      | 21,976  | BAJO     | 39,07                                  | 27,73   | MUY ALTO | ALTO     |
| NARINO             | PASTO               | RIO PASTO, EMBALSE RIO BOBO Y QDAS. CHAPAL Y MIJITAYO | 18,515  | BAJO     | 5,61                                   | 2,85  | MUY ALTO | ALTO     |
| NARINO             | SAN LORENZO         | QDAS. LA CHORRERA Y LA PALMA                          | 0,128   | MODERADO | 0,55                                   | 0,3   | ALTO     | ALTO     |
| NORTE DE SANTANDER | LOS PATIOS          | RIO PAMPLONITA Y QDA. LA HONDA                        | 5,113   | MODERADO | 46,74                                  | 24,08   | ALTO     | ALTO     |
| NORTE DE SANTANDER | PAMPLONA            | QDAS. CARIONGO, EL ROSAL Y EL MONO                    | 2,777   | MODERADO | 19,66                                  | 11,12   | ALTO     | ALTO     |
| SANTANDER          | MALAGA              | QDAS. LA MAGNOLIA Y LOS MOLINOS                       | 1,122   | MODERADO | 2,8                                    | 1,79  | MUY ALTO | ALTO     |
| TOLIMA             | LIBANO              | RIO VALLECITOS  | 1,965   | MODERADO | 20,6                                   | 8,64  | ALTO     | ALTO     |
| VALLE DEL CAUCA    | CALI                | RIOS CAUCA, CALI Y MELENDEZ                           | 196,277   | BAJO     | 1764,53                                | 1076,17   | MODERADO | ALTO     |
| VALLE DEL CAUCA    | BUGA                | RIO GUADALAJARA                                       | 8,891   | MODERADO | 41,34                                  | 22,94   | ALTO     | ALTO     |
| VALLE DEL CAUCA    | PALMIRA             | RIO NIMA  | 19,386  | MODERADO | 64,76                                  | 40,61   | ALTO     | ALTO     |
| VALLE DEL CAUCA    | YUMBO               | RIO YUMBO   | 7,767   | MODERADO | 19,71                                  | 12,02   | MUY ALTO | ALTO     |

**Tabla 5**  
Municipios con IVH medio en condiciones hidrológicas secas (5)

| DEPARTAMENTO | CABECERA MUNICIPAL | NOMBRE FUENTE                                     | DEMANDA HÍDRICA ANUAL 2014 (MILLONES DE METROS CÚBICOS) | IRH CAT. | CONDICIONES HIDROLÓGICAS SECAS         |   |          |          |
|--------------|--------------------|---|---|----------|--|---|----------|----------|
|              |                    |   |   |          | OFERTA ANUAL (MILES DE METROS CÚBICOS) | OFERTA ANUAL DISPONIBLE (MILES DE METROS CÚBICOS) | IUA CAT. | IVH CAT. |
| ANTIOQUIA    | CIUDAD BOLIVAR     | QDA. LOS MONOS                                    | 1,384   | ALTO     | 14,51                                  | 7,34  | MODERADO | MEDIO    |
| ANTIOQUIA    | SALGAR             | QDA. LA SUCRE                                     | 0,502   | ALTO     | 2,62                                   | 1,51  | ALTO     | MEDIO    |
| ANTIOQUIA    | TITIRIBI           | QDAS. LA ZULIA, EL RETIRO, LOS AMAYAS Y DEL MEDIO | 0,469   | MODERADO | 10,51                                  | 10,51   | MODERADO | MEDIO    |
| BOYACA       | CIENEGA            | QDA. EL GUAMO                                     | 0,071   | BAJO     | 3,16                                   | 2,29  | BAJO     | MEDIO    |
| BOYACA       | GARAGOA            | QDAS. LAS MOYAS Y HATILLOS                        | 0,742   | BAJO     | 41,06                                  | 30,28   | BAJO     | MEDIO    |
| BOYACA       | LA CAPILLA         | QDA. LA GUAYA                                     | 0,053   | BAJO     | 43,67                                  | 27,56   | MUY BAJO | MEDIO    |
| BOYACA       | MIRAFLORES         | LAG. EL RAMO Y QDA. LA JORDANERA                  | 0,448   | BAJO     | 33,1                                   | 24,68   | BAJO     | MEDIO    |
| BOYACA       | MONGUA             | RIO LEONERA Y QDA. PEÑABLANCA                     | 0,089   | BAJO     | 21,24                                  | 17,7  | MUY BAJO | MEDIO    |
| BOYACA       | MONGUI             | RIO MORRO   | 0,189   | BAJO     | 19,47                                  | 16,23   | BAJO     | MEDIO    |
| BOYACA       | MONQUIRA           | QDA. LA SICHA                                     | 0,971   | BAJO     | 99,49                                  | 61,61   | BAJO     | MEDIO    |
| BOYACA       | PESCA              | RIO PESCA   | 0,103   | BAJO     | 7,92                                   | 5,91  | BAJO     | MEDIO    |
| CALDAS       | AGUADAS            | QDAS. LA CASTRILLONA, BARRO BLANCO Y CHUCHERA     | 0,581   | ALTO     | 3,97                                   | 2,05  | ALTO     | MEDIO    |
| CALDAS       | MANZANARES         | QDAS. EL ROSARIO Y EL PALO                        | 0,363   | MODERADO | 4,58                                   | 2,82  | MODERADO | MEDIO    |
| CASANARE     | YOPAL              | RIO CRAVO SUR                                     | 8,335   | BAJO     | 1644,6                                 | 1311,8  | MUY BAJO | MEDIO    |
| CUNDINAMARCA | BITUIMA            | RIO CONTADOR Y QDAS. EL SILENCIO Y GUATE          | 0,035   | BAJO     | 64,22                                  | 49,38   | MUY BAJO | MEDIO    |
| CUNDINAMARCA | GACHALA            | QDAS. LOS ANDES, LA MOYA Y BELLAVISTA             | 0,106   | BAJO     | 17,85                                  | 12,4  | MUY BAJO | MEDIO    |
| CUNDINAMARCA | GUASCA             | RIO CHIPATA Y QDA. EL UVAL                        | 0,353   | BAJO     | 23,22                                  | 12,17   | BAJO     | MEDIO    |
| CUNDINAMARCA | JERUSALEN          | QDA. EL TABACO                                    | 0,051   | BAJO     | 1,24                                   | 1,08  | BAJO     | MEDIO    |

**Tabla 5**  
Municipios con IVH medio en condiciones hidrológicas secas (5)

| DEPARTAMENTO       | CABECERA MUNICIPAL | NOMBRE FUENTE   | DEMANDA HÍDRICA ANUAL 2014 (MILLONES DE METROS CÚBICOS) | IRH CAT. | CONDICIONES HIDROLÓGICAS SECAS         |   |          |          |
|--------------------|--------------------|---|---|----------|--|---|----------|----------|
|                    |                    |   |   |          | OFERTA ANUAL (MILES DE METROS CÚBICOS) | OFERTA ANUAL DISPONIBLE (MILES DE METROS CÚBICOS) | IUA CAT. | IVH CAT. |
| CUNDINAMARCA       | NOCAIMA            | QDAS. NATAUTA Y EL TIGRE  | 0,096   | BAJO     | 23,26                                  | 14,32   | MUY BAJO | MEDIO    |
| CUNDINAMARCA       | QUEBRADANEGRA      | QDAS. AGUA CLARA Y LA CHORRERA                                    | 0,013   | BAJO     | 6,31                                   | 3,91  | MUY BAJO | MEDIO    |
| CUNDINAMARCA       | SILVANIA           | RIO BLANCO  | 0,388   | BAJO     | 30,29                                  | 21,01   | BAJO     | MEDIO    |
| CUNDINAMARCA       | SUBACHOQUE         | RIO SUBACHOQUE Y QDA. LA COLORADA                                 | 0,362   | BAJO     | 7,58                                   | 4,59  | BAJO     | MEDIO    |
| CUNDINAMARCA       | VIANI              | RIO CONTADOR Y QDA. LA PEÑA                                       | 0,069   | BAJO     | 57,77                                  | 35,57   | MUY BAJO | MEDIO    |
| CUNDINAMARCA       | VIOTA              | RIO LINDO Y LAGUNA DEL INDIO                                      | 0,294   | BAJO     | 47,61                                  | 24,93   | BAJO     | MEDIO    |
| NORTE DE SANTANDER | OCANA              | RIOS ALGODONAL Y TEJO   | 6,19  | MODERADO | 71,62                                  | 40,74   | MODERADO | MEDIO    |
| NORTE DE SANTANDER | SAN CALIXTO        | QDA. LA MARAVILLA   | 0,102   | BAJO     | 5,95                                   | 3,63  | BAJO     | MEDIO    |
| NORTE DE SANTANDER | TIBU               | RIO TIBU  | 0,958   | BAJO     | 232,28                                 | 150,37  | MUY BAJO | MEDIO    |
| NORTE DE SANTANDER | VILLA DEL ROSARIO  | RIO TACHIRA   | 6,099   | BAJO     | 224,03                                 | 154,98  | BAJO     | MEDIO    |
| RISARALDA          | PEREIRA            | RIO OTUN  | 27,878  | ALTO     | 129,39                                 | 70  | ALTO     | MEDIO    |
| RISARALDA          | MISTRATO           | QDA. ARRAYANAL  | 0,263   | MODERADO | 2,55                                   | 1,4   | MODERADO | MEDIO    |
| SANTANDER          | BUCARAMANGA        | ACUEDUCTO METROPOLITANO DE BUCARAMANGA (RIOS TONA, FRIO Y SURATA) | 44,716  | ALTO     | 1,98                                   | 1,26  | MUY ALTO | MEDIO    |
| SANTANDER          | BOLIVAR            | QDAS. LA HERVEDORA Y POZO VERDE                                   | 0,067   | BAJO     | 11,69                                  | 7,24  | MUY BAJO | MEDIO    |
| SANTANDER          | CHIPATA            | QDA. LA GILERIA   | 0,036   | BAJO     | 6,16                                   | 3,81  | MUY BAJO | MEDIO    |
| TOLIMA             | IBAGUE             | RIO COMBEIMA Y QDA. CAY   | 42,11   | ALTO     | 61,11                                  | 32,44   | MUY ALTO | MEDIO    |
| TOLIMA             | COYAIMA            | RIOS SALDANA Y MECHE  | 0,317   | MUY BAJO | 3619,78                                | 1760,97   | MUY BAJO | MEDIO    |
| TOLIMA             | MELGAR             | RIO SUMAPAZ Y QDA. LA MELGARA                                     | 2,996   | BAJO     | 403,25                                 | 259,66  | BAJO     | MEDIO    |
| TOLIMA             | NATAGAIMA          | RIO ANCHIQUE  | 1,1   | MUY BAJO | 49,98                                  | 42,57   | BAJO     | MEDIO    |

## CAUSAS DE ESCASEZ DE AGUA POTABLE EN DICHS MUNICIPIOS

Los principales factores que han incidido en la escasez de agua potable son la deforestación, el verano intenso, la contaminación y la falta de inversión.

### DEFORESTACIÓN

En 1966 se estimaba que el 62,1 % de la superficie del país estaba cubierta por bosques (70,8 millones de hectáreas), y que para 1988 la superficie del país cubierta por bosques se había reducido a 54 millones de hectáreas (ha). Durante el año 2016 se perdieron 178.597 hectáreas de bosque natural, distribuidas en las cinco regiones en que está dividido el país, de la siguiente manera: región de la Amazonia, 70.074 ha; región Andina, 45.606 ha; región del Pacífico, 29.009 ha; región del Caribe, 24.509 ha, y región de la Orinoquía, 9398 ha. Seis departamentos concentraban el 67 % de la deforestación nacional: Caquetá, Chocó, Meta, Antioquia, Norte de Santander y Guaviare. La deforestación se incrementó en el año 2016 un 44 % respecto al año 2015 [6].

Las causas de la deforestación están asociadas principalmente con los siguientes fenómenos:

- **Ganadería extensiva.** Se considera que es la mayor causa de deforestación a escala nacional. Es un sector poco eficiente, puesto que se cuenta con cerca de 25 millones de cabezas distribuidas en un área aproximada de 38 millones de ha (un promedio de 0,6 cabezas por ha) [7].
- **Extracción de madera.** La tala y el tráfico ilegal de madera son considerados la segunda causa de deforestación en el ámbito nacional.
- **Ampliación de las áreas cultivadas.** La ampliación de la frontera agrícola es ocasionada por varios factores, entre estos el fenómeno de desplazamiento de ciudadanos por causa del conflicto interno del país, que al verse obligados a dejar sus tierras por presión de los grupos armados se desplazan a nuevas áreas, donde transforman los bosques en cultivos para su subsistencia, y posteriormente los convierten en potreros.
- **Construcción de vías.** Expansión de infraestructura vial.
- **Cultivos de uso ilícito.** Los programas de erradicación de cultivos ilícitos han presionado al campe-

sinado a desplazarse a zonas cada vez más distantes y alejadas de las áreas pobladas, generando colonización de áreas naturales que poseen un alto valor para la conservación. El Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS) manifestó que en el año 2017 la deforestación causada por los cultivos de coca representó el 24 % del total deforestado en el territorio nacional. La Dirección Antinarcóticos de la Policía Nacional afirma que los cultivos ilícitos generan vertimientos de sustancias químicas que afectan el suelo y el agua en un orden de 3,5 toneladas por hectárea al año [8].

- **Extracción ilícita de minerales.** La destrucción de los bosques para explotación minera ilegal tiene graves efectos ecológicos y elevados costos monetarios, entre los que se pueden mencionar los siguientes:
  - Aumento de procesos erosivos y del riesgo de desertificación.
  - Pérdida de la regulación de las aguas superficiales y del subsuelo.
  - Modificación de los procesos de interceptación, infiltración y evapotranspiración.
  - Pérdida de la calidad del agua.

La desprotección de las fuentes de agua, los cambios de clima, así como el incremento de la erosión y la desertización, producen cambios en la vegetación, alteran el ciclo hídrico, la cantidad, la distribución y la frecuencia de las lluvias.

Cada año, se derriban entre 17 y 20 millones de hectáreas de bosque tropical. Los bosques tropicales contienen 155.000 de las 250.000 especies de plantas conocidas. Colombia se encuentra entre los países donde más se talan los bosques tropicales, junto a Indonesia, República Democrática del Congo, Costa de Marfil, Ghana, Brasil, Bolivia, México y Perú [9].

### Verano intenso

Aun cuando el territorio colombiano está sujeto a un régimen de estaciones bimodal, la ocurrencia de veranos intensos se asocia al fenómeno del Niño.

Para corroborar este hecho, el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam) estudió mensualmente dicho fenómeno durante el periodo comprendido entre los años 1970 y 2010. Se evidenció

que para las regiones Andina y Caribe el impacto es altamente significativo.

Es así como en “el 80 % de los eventos del Niño, las deficiencias de lluvia impactan más del 50 % del territorio, sobre todo en las regiones Caribe y Andina. En la región Pacífica, el porcentaje de eventos con impacto significativo se reduce a poco más del 50 %” [10].

En lo referente a la región Pacífica, la deficiencia de lluvia es significativa, puesto que la mitad de los eventos ocurridos así lo mostraron [10].

El Niño no tuvo efectos significativos en la Amazonia y en la Orinoquia, excepto a lo largo del periodo comprendido entre los años 1976-1977, con déficits del 60 % y el 80 %, respectivamente [10].

### Contaminación de las fuentes de agua

En el territorio colombiano se pueden distinguir cinco grandes áreas hidrográficas:

- Amazonas.
- Caribe.
- Magdalena-Cauca.
- Orinoco.
- Pacífico.

Entre estas se destaca el área Magdalena-Cauca, que abarca 19 departamentos y sirve de residencia a la mayor parte de la población del país. Es allí y en la zona Caribe donde la contaminación de las aguas afecta a cerca de 17.500.000 habitantes. Se estima que anualmente se vierten a los cuerpos de agua cerca de 756.945 toneladas de materia orgánica biodegradable y alrededor de 918.670 toneladas de sustancias químicas.

“El 80 % de esas cargas son aportadas por cerca de 50 municipios, principalmente por áreas urbanas de gran población, como Bogotá, Medellín, Cali, Barranquilla y Cartagena. Ahora, si analizamos el asunto desde el punto de vista de la carga de químicos vertidos, los que más contribuyen son la industria y el sector doméstico. Afecta a ríos como el Bogotá, el Sumapaz, el Lebrija —en Santander— y otros que desembocan en el mar Caribe”, explica Nelson Ómar Vargas, subdirector de Hidrología del Ideam [11].

Las principales fuentes de alteración de la calidad del recurso hídrico en el país identificadas por el Ideam son:  
Aguas residuales domésticas.

- Aguas residuales industriales.
- Aguas residuales de producción agrícola y ganadera.
- Aguas lluvias.
- Transporte terrestre, fluvial y marítimo de sustancias peligrosas, así como de petróleo y sus derivados.
- Obras de infraestructura.
- Aguas de lavado del proceso de extracción minera.
- Residuos sólidos dispuestos en rellenos sanitarios o directamente en cuerpos de agua [12].

### Falta de inversión

De acuerdo con el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE), Colombia posee una cobertura en materia de acueducto del 92,3 % (3,6 millones de personas no cuentan con acceso) y para alcantarillado la cobertura ronda el 88,2 % (5,6 millones de personas carecen de él). Sin embargo, en las áreas rurales el panorama es desalentador, puesto que cerca del 75 % carece de los dos servicios [13].

Las inversiones destinadas a saneamiento y agua potable han sufrido los embates de malas administraciones y han sido blanco de la corrupción desde hace bastante tiempo.

Durante el periodo 2012-2016, se hicieron inversiones en 920 proyectos de agua y saneamiento básico por un valor de \$1,8 billones; sin embargo, apenas 541 de los 1122 municipios que componen el país cuentan con plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR), y solo el 31 % de las ciudades cuentan con sistemas de tratamiento eficiente.

Según la Contraloría General de la República (CGR), en el periodo 2015-2017 había un 46 % de obras inconclusas en el territorio nacional, que corresponden a plantas de tratamiento y alcantarillado que quedaron a mitad de ejecución, o que no proveen a las comunidades agua apta para su consumo.

Con el fin de establecer cuán eficientes son los recursos de regalías destinados a este sector, se tomó una muestra de 23 proyectos distribuidos en 7 departamentos (obras evaluadas en \$39.000 millones). El resultado fue desalentador, puesto que la mayoría de estas obras no cumplen con el cometido de llevar agua potable a las comunidades. Las razones son las siguientes: “La infraestructura está subutilizada, los laboratorios para el monitoreo de agua no se están usando, faltan insumos para que las plantas de tratamiento puedan funcionar o

porque falta capacitar al personal. También hay infraestructura mal construida o literalmente abandonada”. Es así como el 65 % de las obras no cumplen la función para la cual se diseñaron.

Otras cifras para destacar son estas:

- El 87 % de los proyectos no son sostenibles económicamente.
- El 50 % de las obras no cumple con los requisitos técnicos exigidos.
- El 50 % de las obras no cumple con las licencias de captación de aguas.
- El 53 % de los proyectos no hace pruebas para determinar el índice de riesgo de calidad del agua.
- El 66 % de los proyectos que hace pruebas para determinar el índice de riesgo de calidad del agua entregan al consumidor final agua no apta para su consumo [14].

## SOLUCIONES CONOCIDAS APROPIADAS PARA ELIMINAR LAS CAUSAS DE ESCASEZ DE AGUA POTABLE EN EL PAÍS

### Detener la deforestación y desarrollar programas de reforestación

Conservar la vegetación natural de los ríos es determinante en la infiltración y en la escorrentía (flujo de agua) puesto que, a menor vegetación, mayores serán la escorrentía y el riesgo de sufrir inundaciones.

Si bien la tasa de deforestación en Colombia ha disminuido, continúa siendo una de las más altas al compararla con el promedio mundial.

El Ideam ha identificado nuevos focos de deforestación a lo largo y ancho del territorio nacional, los cuales se encuentran localizados en “el sur del Meta, el noroccidente de Caquetá, el nororiente del Guainía, el departamento del Putumayo, los Santanderes, el Magdalena Medio, la cordillera Central y el departamento de Nariño” [2].

El Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS) (2019) enfrentará este problema a través de cuatro planes:

- Visión Amazonia, por intermedio de su pilar 1, “Gobernanza forestal”.
- Fortalecimiento al control del tráfico ilegal de madera.
- Creación del bloque de búsqueda contra la minería criminal.

- Profundización del Pacto Intersectorial por la Madera Legal.

El país cuenta con una serie de normas y decretos que buscan promover la protección del recurso hídrico:

La Ley 99 de 1993 del Congreso de la República de Colombia, en el artículo 111, modificado por el artículo 210 de la Ley 1450 de 2011, dispone que para los departamentos y municipios se destinará un porcentaje no inferior al 1 % de los ingresos corrientes para la adquisición y mantenimiento de las áreas de importancia estratégica para la conservación de recursos hídricos que surten de agua a los acueductos municipales, distritales y regionales, o para financiar esquemas de pago por servicios ambientales en dichas áreas.

Por lo anterior, el Decreto 953 entra a reglamentar y establecer los lineamientos para la identificación, delimitación y priorización de las áreas estratégicas por parte de las autoridades ambientales y define criterios técnicos para la selección de predios por parte de las entidades territoriales, dándoles las opciones de adquirir el área o de aplicar el incentivo económico de Pago por Servicios Ambientales (PSA), indicando el procedimiento para la adquisición y mantenimiento de los predios, el cálculo del valor del incentivo que se va a reconocer, el desarrollo de contratos por parte de entidades territoriales y la aplicación de los mecanismos de seguimiento del PSA.

El Pago por Servicios Ambientales asociados al recurso hídrico se define como el incentivo en dinero o en especie que las entidades territoriales podrán reconocer contractualmente a los propietarios y poseedores regulares de predios ubicados en las áreas de importancia estratégica, en forma transitoria, por un uso del suelo que permita la conservación o recuperación de los ecosistemas naturales y, en consecuencia, la provisión y el mejoramiento de los servicios ambientales asociados al recurso hídrico.

Con la implementación de los esquemas de pago por servicios ambientales se busca fortalecer los valores culturales y el reconocimiento social, asociados a la conservación de los recursos hídricos y de la biodiversidad del país.

Como herramienta de seguimiento, las entidades territoriales deben reportar a las autoridades ambientales competentes un inventario anual de los predios adquiridos o esquemas de Pago por Servicios Ambientales

financiados, con copia al Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.

En el año 2007, las corporaciones autónomas regionales (CAR) invirtieron el 41 % en reforestación, y ya que la conservación es un problema de incentivos de uso del suelo, hay que crear las condiciones para que el empleo de la tierra sea más eficiente y así reducir la eliminación de los bosques [15].

### Proteger los páramos

Colombia posee el 42,48 % de este tipo de ecosistemas a escala global. Prestan funciones importantes, son ideales para recoger, filtrar y regular el agua que llega por lluvia, neblina y deshielo de los glaciares, liberando de manera gradual y constante agua limpia y pura, hasta el punto de que el 70 % del agua dulce de Colombia proviene de estas áreas. Estas son razones más que suficientes para que sea necesario protegerlos, cuidarlos y recuperarlos [16].

La ley de páramos busca la gestión integral de este tipo de ecosistemas. Entre otras cosas, establece y prohíbe las actividades que se pueden desarrollar en el interior de estos. Adicionalmente, destina recursos provenientes del impuesto al carbono para proteger este ecosistema estratégico, así como el desarrollo de actividades productivas permitidas.

En la Ley 1930, expedida el 27 de julio de 2018 por el Congreso de Colombia, se dictan las disposiciones para la gestión integral de los páramos en Colombia, con el objeto de establecer como ecosistemas estratégicos los páramos, al igual que fijar directrices que propugnan su integralidad, preservación, restauración, uso sostenible y generación de conocimiento.

### Cierre de la frontera agrícola

La frontera agrícola es “el límite del suelo rural que separa las áreas donde las actividades agropecuarias están permitidas de las áreas protegidas, las de especial importancia ecológica, y las demás áreas en las que las actividades agropecuarias están excluidas por mandato de la ley o el reglamento” [17]. Definir que la frontera agrícola asciende a 40.075.960 hectáreas es importante, puesto que limita las áreas donde se pueden realizar actividades agrícolas, pecuarias, forestales, de acuicultura y pesca, y paralelamente define los 60.000.000 de

hectáreas que hay que proteger y que corresponden a bosques naturales, páramos, humedales Ramsar y áreas de importancia ambiental para el país [18].

### Cumplimiento de norma de vertimientos

El Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS) presentó la Resolución 0631 de marzo de 2015, Norma de vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público, la cual “... busca reducir y controlar las sustancias contaminantes que llegan a los ríos, embalses, lagunas, cuerpos de aguas naturales o artificiales de agua dulce, y al sistema de alcantarillado público, para de esta forma aportar al mejoramiento de la calidad del agua y trabajar en la recuperación ambiental de las arterias fluviales del país” [19].

### Reducción de la demanda

Se estima que el 65 % del agua a escala mundial se destina a la agricultura, el 25 % al sector industrial y el 10 % restante al consumo doméstico y comercial. En el ámbito nacional, la demanda hídrica durante el año 2012 alcanzó los 35.987 millones de m<sup>3</sup>, de los cuales 46,6 % (16.760,33 millones de m<sup>3</sup>) se destinaron a uso agrícola, 21,5 % correspondieron al uso para generación de energía, 8,5 % al sector pecuario, 8,2 % a uso doméstico, 5,9 % a uso industrial, 4,6 % a uso acuícola, y los sectores de minería, hidrocarburos y servicios el 1,8 %, 1,6 % y 1,3 %, respectivamente.

Si bien es cierto que el sector agrícola ha reducido de manera leve su demanda (antes su porcentaje era superior al 50 %), aún sigue siendo el renglón productivo que más utiliza el recurso hídrico, siendo los cultivos de arroz, palma, caña y plátano algunos de los más demandantes.

### Captación y almacenamiento de aguas lluvias

La captación y el aprovechamiento de las aguas lluvias forman parte de las estrategias del uso racional del agua. En el sector rural, se requiere agua que permita suplir los siguientes tipos de consumo:

- Uso doméstico.
- Producción agrícola.

- Consumo animal.
- Usos varios.
- Pérdidas de origen natural (evaporación, escorrentía y percolación).

Con el objeto de suministrar el agua requerida se han desarrollado técnicas empíricas para la captación de aguas lluvia, que suelen agruparse conforme a su modalidad de captación:

### Microcaptación

Se capta la escorrentía superficial del terreno de cultivo con el propósito de que se infiltre y sea aprovechada para los cultivos.

### Macrocaptación

Es similar a la técnica anterior, con la salvedad de que las áreas para captar la escorrentía suelen ser más grandes, con escasa cobertura vegetal o carentes de esta, con el fin de que se genere una gran escorrentía superficial que se pueda encauzar a través de canales, acequias, surcos y camellones para almacenarla en estanques o reservorios, o para conducirla de manera directa hacia las áreas de cultivo.

### Cosecha de agua de techos de viviendas y estructuras impermeables

Es el método más conocido y que permite obtener agua de mejor calidad para emplearla en el consumo doméstico. Consiste en captar la escorrentía de superficies impermeables, como cubiertas, superficies rocosas y demás.

### Captación de agua atmosférica

En ciertas condiciones particulares de clima y orografía, es posible captar la niebla que se desplaza a nivel atmosférico [3].

### Sistemas de detección y prevención de fugas

Según estándares internacionales, se permite hasta un 30 % de desperdicio asociado a fugas de agua, pero de

acuerdo con cifras entregadas por el Departamento Nacional de Planeación (DNP), este porcentaje en Colombia asciende a un 43 %, siendo el caso más crítico el departamento de La Guajira, donde esta cifra alcanza un 82 %.

En Bogotá, la pérdida de líquido llega al 38 %, y en departamentos como San Andrés, Magdalena y Guaviare se alcanzan valores de 79 %, 60 % y 57 %, en ese orden.

Básicamente, este 43 % que se pierde en promedio en el ámbito nacional implica que por cada diez litros de agua se pierden cuatro litros por causas asociadas a deterioro de redes de distribución, fuga o rebosamiento de los tanques de almacenamiento.

Las medidas de control y reducción de pérdidas se pueden clasificar de acuerdo con el tipo de pérdidas que presenta el sistema:

### Pérdidas físicas

- **Mantenimiento correctivo.** Es un método pasivo de control, puesto que tan solo se realiza tras la ocurrencia de una falla. Su principal desventaja es que solamente actúa sobre las pérdidas cuando estas se evidencian.
- **Mantenimiento preventivo.** Consiste en la ejecución de labores de inspección de las redes sin que haya de por medio evidencia de una falla, con el propósito de preservar sus condiciones de funcionamiento.
- **Control de presión en la red.** Se logra a través de la sectorización de las redes de distribución.

### Pérdidas y consumos operativos

Entre las medidas más frecuentes, se destacan las siguientes:

- Instalar macromedidores entre las etapas de producción y distribución.
- Instalar medidores de nivel en los estanques de regulación.
- Mejorar los medios de comunicación entre las unidades del sistema.
- Aplicar tecnología de telemedición y telecontrol a elementos pertinentes del sistema (macromedidores, válvulas reguladoras de presión y otros).

### Pérdidas comerciales

Las acciones que se toman con el objeto de reducir y controlar este tipo de pérdidas giran en torno a minimizar los errores de medición y combatir los consumos fraudulentos. Con estas medidas se busca prevenir y corregir, así como sancionar a las personas que de manera fraudulenta gozan del suministro de agua [20].

### Aprovechamiento de aguas subterráneas

Se estima que Colombia cuenta con reservas de agua subterránea que cubren alrededor del 74 % del territorio nacional, distribuidas en 16 provincias hidrogeológicas. Estas alcanzan un volumen total estimado que asciende a  $5,848 \times 10^9$  metros cúbicos (5848 km<sup>3</sup>).

Las mayores reservas se encuentran en las provincias de Llanos Orientales, Caguán - Putumayo y cordillera Oriental.

El sector agrícola es el sector de la economía que mayor uso hace del agua subterránea (75 %), seguido por los sectores doméstico (9 %) e industrial (7 %), siendo el departamento del Valle del Cauca el mayor consumidor, con un 58 % del total consumido por este sector a escala nacional.

Las aguas subterráneas son un recurso estratégico para enfrentar el cambio climático y las futuras disminuciones de caudal en el país. No obstante, se hace necesario realizar estudios que permitan conocerlos de manera apropiada, puesto que tan solo 10 de los 44 acuíferos que se identificaron en el territorio nacional cuentan con información adecuada para su aprovechamiento [21].

## SOLUCIONES FACTIBLES PARA ATENDER LOS PROBLEMAS DE ESCASEZ DE AGUA POTABLE

### Actividades en contra de la deforestación

Entre dichas actividades, se pueden mencionar:

#### *Bonos de carbono*

Los bonos de carbono se crearon con la intención de que aquellos países o empresas que sobrepasen su cuota de gases de efecto invernadero puedan reducirla comprando este tipo de bonos a países menos contaminantes.

En virtud de que el 54 % del territorio nacional está cubierto por bosques, Colombia tiene una gran

oportunidad para el establecimiento de proyectos de reforestación y conservación de bosques naturales.

Como muestra de la implementación de este tipo de estrategias, en Acandí (Chocó) se conformó el Consejo Comunitario de las Comunidades Negras de la Cuenca del Río Tolo y Zona Costera Sur (Cocomasur), encargado de proteger 13.400 hectáreas que les adjudicaron como título colectivo. Su labor consiste en impedir la tala de los bosques distribuidos a lo largo de las 150 parcelas en las que está dividida el área que se les otorgó, y de esta manera vender a terceros la capacidad que tienen estos bosques para captar dióxido de carbono.

### *Cumplimiento de la legislación ambiental*

Colombia tiene una legislación que pretende velar por el cuidado de las cuencas, razón por la cual hay que promover el control y el cumplimiento de dicha normativa.

### *Artemisa [22]*

En los últimos años, Colombia ha perdido alrededor de 200.000 hectáreas anuales de bosques y selva húmeda tropical. Con el propósito de frenar esta andanada deforestadora, el gobierno nacional ideó la campaña Artemisa, que por medio del trabajo interinstitucional de la Fiscalía General de la Nación, el Ministerio de Ambiente, Parques Nacionales, el Ideam, Fuerza Pública y actividades locales, busca:

- Detener la avanzada de la deforestación en el país.
- Recuperar las selvas y bosques nacionales.
- Judicializar a los causantes de la deforestación.

### *Protección de páramos*

El ecosistema de páramo se encuentra presente en apenas cinco países del mundo, y solo Colombia posee cerca del 50 % de estas fábricas de agua de las que proviene el líquido que consumen 7 de cada 10 colombianos. Por primera vez en la historia del país se cuenta con una herramienta (Ley 1930) que de manera específica pretende velar por la salvaguarda de este ecosistema, prohibiendo entre otras cosas la explotación minera en estas áreas y otorgando fuentes de financiación para que los pobladores que históricamente se encuentran

asentados en estas áreas puedan hacer una reconversión de sus actividades productivas.

### **Implementación de normas de vertimientos**

Es vital que la institucionalidad y la ciudadanía velen por el cumplimiento de las normas ambientales que permitirán disminuir la carga contaminante de muchos de los ríos, quebradas y humedales que se encuentran a lo largo y ancho del territorio nacional.

### **Explotación de aguas subterráneas**

El agua subterránea constituye más del 95 % de las reservas de agua dulce del planeta, razón por la cual surge como una importante opción para hacer frente al riesgo de desabastecimiento.

En Colombia se han identificado 44 sistemas acuíferos, de los que apenas 10 cuentan con información adecuada para hacer una gestión idónea del recurso hídrico allí almacenado, 13 sistemas acuíferos tienen información aceptable y 21 carecen de información técnica.

Se hace vital estudiar los acuíferos, en especial los de Turbaco, Santa Marta, Maicao, Valle del Cauca, Duitama-Sogamoso, Sabana de Bogotá, Glacis del Quindío, Golfo de Urabá, Mariquita-Dorada-Salgar, ya que su estudio es clave para enfrentar la vulnerabilidad al desabastecimiento. Además, esto permitirá no solo tomar decisiones respecto a su utilización y gestión, sino también que se conviertan en una opción válida para preservar la seguridad hídrica ante sequías e inundaciones.

## **ESTRATEGIAS DE CAPTACIÓN Y ALMACENAMIENTO DE AGUA LLUVIA**

Algunos métodos existentes para el aprovechamiento del agua lluvia son los siguientes:

### **Captación de agua lluvia a través de techos y otras superficies impermeables**

#### **Captación de techo**

El agua que se capta a través de techos posee una buena calidad en relación con la colectada mediante otros mé-

todos, motivo por el cual suele emplearse para consumo humano. Básicamente, este sistema está compuesto por:

- Techo.
- Canaletas.
- Acoples.
- Tubería de conducción.
- Malla fina.

### **Captación a través de otras estructuras impermeables**

Esta agua es la proveniente de estructuras tales como patios, canchas, parqueaderos y losas para secado de granos, construidas en materiales que impiden al líquido infiltrarse libremente en el suelo. Sin embargo, tienen algunas desventajas, entre otras, que por estar a nivel del suelo obligan a que la estructura en la que se almacena el agua deba estar en un nivel inferior a la superficie del suelo, dificultando su utilización. Este sistema se compone de:

- Área de captación.
- Filtro.
- Tubería de conducción.

### **Captación de niebla**

La neblina se compone de pequeñas partículas de agua, de entre 10,8 y 15,3 micrones de diámetro, lográndose así una concentración de 400 gotas/cm<sup>3</sup>, aproximadamente.

Estas partículas se pueden atrapar mediante paneles atrapaniebla, que están compuestos por dos postes (se emplea el material de que se disponga en la zona) fijados al suelo, que sujetan una guaya sobre la cual se instala una doble cortina de malla tipo raschel. Estas mallas poseen unas dimensiones de 3 a 4 metros de alto por 10 o 12 metros de largo. Además, hay que utilizar guayas adicionales, las cuales se instalarán como tirantes (figura 1).

El agua transportada por la neblina es atrapada al chocar con la malla. Paulatinamente, se atrapan más y más gotas que se desplazan de manera lenta en sentido descendente a través de la malla, hasta verterse en una canaleta que se encuentra instalada en la parte inferior de la malla, para posteriormente conducir las a un estanque de almacenamiento [23].



**Figura 1.** Panel atrapaniebla.

**Fuente:** Captación y almacenamiento de aguas de lluvia. Opciones técnicas para la agricultura familiar en América Latina y el Caribe. Santiago de Chile: FAO, abril de 2013.

## CONCLUSIONES

En Colombia, los municipios con escasez de agua potable (IVH alto), para condiciones hidrológicas promedio, son Floresta, Paipa y Soracá, en el departamento de Boyacá; Sibaté, en el departamento de Cundinamarca; Santa Marta, en el departamento del Magdalena; Pasto, en el departamento de Nariño; Pamplona, en el departamento de Norte de Santander, y Yumbo, en el departamento del Valle del Cauca.

En Colombia, los municipios con escasez de agua potable (IVH alto), para condiciones hidrológicas secas, son Chiquinquirá, en el departamento de Boyacá, y Maicao, en La Guajira.

En Colombia, los municipios con escasez de agua potable (IVH muy alto), para condiciones hidrológicas secas, son El Santuario, en el departamento de Antioquia; Floresta, Oicatá, Paipa, Santa Rosa de Viterbo, Soracá y Toca, en el departamento de Boyacá; Valledupar, El Copey y La Jagua de Ibirico, en el departamento del Cesar; El Colegio, Guatavita, Sibaté, Topaipí, Villeta y Yacopí, en el departamento de Cundinamarca; Santa Marta, en el departamento de Magdalena; Pasto y San Lorenzo, en el departamento de Nariño; Los Patios y Pamplona, en el departamento de Santander; Líbano, en el departamento del Tolima, y Cali, Buga, Palmira y Yumbo, en el departamento del Valle del Cauca.

Las causas de escasez de agua potable en dichos municipios, señaladas por el Ideam y varios autores, son la deforestación, el verano intenso, la contaminación y la falta de inversión.

Las soluciones señaladas generalmente como apropiadas para eliminar las causas de escasez de agua potable en el país son detener la deforestación, proteger

los páramos, cerrar la frontera agrícola, hacer cumplir la norma de vertimientos, reducir la demanda, captar y almacenar aguas lluvias, detectar y prevenir fugas, y aprovechar las aguas subterráneas.

Colombia tiene una riqueza hídrica inigualable en el mundo, lo que indica que las causas principales de escasez son la excesiva pérdida existente en los sistemas de distribución y la ausencia de una inversión económica adecuada, efectiva y eficiente.

## REFERENCIAS

- [1] Angarita Torres, L. G. (2019, mayo). *Opciones para mitigar la escasez de agua potable en Colombia*. Tesis para optar al título de magíster en Ingeniería Civil con énfasis en Recursos Hidráulicos y Medio Ambiente. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería.
- [2] Revista *Semana* (2014, 2 de mayo). Colombia tiene una nueva estrategia contra la deforestación. Recuperado de *Semana Sostenible*: <https://sostenibilidad.semana.com/medio-ambiente/articulo/colombia-tiene-nueva-estrategia-contra-deforestacion/31149> 18 de febrero de 2019
- [3] Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). Chile (abril de 2013). Captación y almacenamiento de agua de lluvia. Opciones técnicas para la agricultura familiar en América Latina y el Caribe. Recuperado de [http://www.fao.org/fileadmin/user\\_upload/AGRO\\_Noticias/docs/captacion\\_agua\\_de\\_lluvia.pdf](http://www.fao.org/fileadmin/user_upload/AGRO_Noticias/docs/captacion_agua_de_lluvia.pdf) el día 4 de marzo de 2019.
- [4] Revista *Semana* (2014, 2 de mayo). Colombia tiene una nueva estrategia contra la deforestación. Recuperado de *Semana Sostenible*: <https://sostenibilidad.semana.com/medio-ambiente/articulo/colombia-tiene-nueva-estrategia-contra-deforestacion/31149>, 18 de febrero de 2019.
- [5] Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Ideam y Estudio Nacional del Agua 2014 (2015). Bogotá, mayo de 2015
- [6] Pardo, T. (2018). Bosques: territorios de vida.
- [7] Vergara, W. (2010, septiembre). La ganadería extensiva y el modelo agrario. El reto de un modelo de desarrollo rural sostenible para Colombia. Recuperado de [https://www.academia.edu/34058040/La\\_ganader%C3%ADa\\_extensiva\\_y\\_el\\_problema\\_agrario\\_El\\_reto\\_de\\_un\\_modelo\\_de\\_desarrollo\\_rural\\_sustentable\\_para\\_Colombia](https://www.academia.edu/34058040/La_ganader%C3%ADa_extensiva_y_el_problema_agrario_El_reto_de_un_modelo_de_desarrollo_rural_sustentable_para_Colombia) el día 3 de febrero de 2019.
- [8] Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2019). Minambiente llamó la atención sobre impactos de cultivos ilícitos en Colombia. Recuperado de <http://www.minambiente.gov.co/index.php/noticias/4264-minambiente-llamo-la-atencion-sobre-impactos-de-cultivos-ilicitos-en-bosques-de-colombia> el día 12 de marzo de 2019.
- [9] Revista *Semana* (2014, 2 de mayo). Colombia tiene una nueva estrategia contra la deforestación. Recuperado de *Semana Sostenible*: <https://sostenibilidad.semana.com/medio-ambiente/articulo/colombia-tiene-nueva-estrategia-contra-deforestacion/31149> 18 de febrero de 2019.
- [10] Hurtado Moreno, G., & González, O. C., Agrometeorología, G. D., & Meteorología-Ideam, s.d. (s.f.). Evaluación de la afectación territorial de los fenómenos del Niño/la Niña y análisis de la confiabilidad de la predicción climática basada en la presencia de un evento. Recuperado de Ideam:<http://www.ideam.gov.co/documents/21021/440517/Evaluaci%C3%B3n+de+la+Afectaci%C3%B3n+Territorial.pdf> el día 25 de noviembre de 2018.

- [11] Puentes Ramos, J. (2017, 13 de diciembre). Reportajes. Estas son las regiones con la mejor y la peor agua de Colombia. Recuperado de <https://semanarural.com/web/articulo/estos-son-las-regiones-con-la-mejor-y-la-peor-agua-de-colombia/306> el día 28 de enero de 2019.
- [12] Segura, L. E. (2007) Estudio de antecedentes sobre la contaminación hídrica. Informe de prácticas. Administrador público. Escuela Superior de Administración Pública (ESAP). Recuperado de <http://cdim.esap.edu.co/bancomedios/Documentos%20PDF/estudio%20de%20antecedentes%20sobre%20la%20contaminaci%C3%B3n%20h%C3%ADdrica.pdf> el día 9 de mayo de 2019.
- [13] Delgado Gómez, P. (2018, 26 de julio). Lo que falta en suministro de agua y alcantarillado en Colombia. *El Espectador*. Recuperado de <https://www.elespectador.com/economia/lo-que-falta-en-suministro-de-agua-y-alcantarillado-en-colombia-articulo-802501> el día 26 de abril de 2019.
- [14] Sarralde, M. (2018, 24 de julio). Así se derrocha la plata que debería ser para agua potable. *El Tiempo*. Recuperado de <https://www.eltiempo.com/justicia/investigacion/recursos-para-el-agua-botin-de-corrupcion-en-colombia-segun-la-contraloria-246180> el día 24 de abril de 2019.
- [15] Visión Amazonia (s.f.). *Gobernanza forestal*. Recuperado de Minambiente- Gobierno de Colombia: <http://visionamazonia.minambiente.gov.co/pilar-1-gobernanza-forestal/> el día 29 de abril de 2019.
- [16] Minambiente (2017, 17 de octubre). Estrategia integral de control a la deforestación y gestión de los bosques. Recuperado de [http://www.minambiente.gov.co/images/Estrategia\\_deforestacion\\_Ministro\\_Murillo.pdf](http://www.minambiente.gov.co/images/Estrategia_deforestacion_Ministro_Murillo.pdf) el día 18 de diciembre de 2018.
- [14] Herrera Santoyo, H. (2013, 4 de marzo). *Páramos = agua = vida*. Recuperado de AIDA: <https://aidaamericas.org/es/blog/p%C3%A1ramos-agua-vida> el día 10 de diciembre de 2018.
- [17] Unidad de Planificación Rural Agropecuaria (UPRA) (2018, 31 de enero). Identificación General de la Frontera Agrícola en Colombia, a escala 1:100.000. Recuperado de Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural: [https://www.minagricultura.gov.co/Normatividad/Projects\\_Documents/IDENTIFICACION%20GENERAL%20DE%20LA%20FRONTERA%20.pdf](https://www.minagricultura.gov.co/Normatividad/Projects_Documents/IDENTIFICACION%20GENERAL%20DE%20LA%20FRONTERA%20.pdf) el día 18 de marzo de 2019.
- [18] Presidencia de la República de Colombia (2018, 21 de junio). Gobierno definió Frontera Agrícola Nacional para avanzar hacia el desarrollo rural sostenible y proteger la biodiversidad. Recuperado de Presidencia de la República de Colombia: <http://es.presidencia.gov.co/noticia/180621-Gobierno-definio-Frontera-Agricola-Nacional-para-avanzar-hacia-el-desarrollo-rural-sostenible-y-proteger-la-biodiversidad> el día 14 de abril de 2019.
- [19] Minambiente (2015, 18 de marzo). Minambiente presenta nueva norma de vertimientos que permitirá mejorar la calidad de agua del país. Recuperado de Minambiente-El ambiente es de todos: <http://www.minambiente.gov.co/index.php/noticias/1700-minambiente-presenta-nueva-norma-de-vertimientos-que-permitira-mejorar-la-calidad-agua-del-pais> el día 17 de febrero de 2019.
- [20] Caldes, G. (2017, 8 de febrero). Las pérdidas de agua, un tema pendiente. Se resuelve con gestión y uso de tecnologías. Agua, Chile. Recuperado de <https://www.iagua.es/blogs/gabriel-caldes/disminucion-perdidas-agua-no-es-problema-tecnico-es-gestion-y-gobernanza> el día 2 de abril de 2019.
- [21] Ideam (2013). *Aguas subterráneas en Colombia: una visión general*. Bogotá, D.C., 284 pp. Recuperado de <http://acuiferosuraba.net/wp-content/uploads/2016/08/Libro-Aguas-Subterr%C3%A1neas-en-Colombia-Una-Visi%C3%B3n-General.pdf> el día 6 de diciembre de 2018.
- [22] Herrera, E. (2019, 28 de abril). Declaración del presidente Iván Duque en la presentación de la campaña Artemisa contra la deforestación. Presidencia de la República de Colombia. Recuperado de <https://id.presidencia.gov.co/Paginas/prensa/2019/190428-Declaracion-del-Presidente-Ivan-Duque-en-la-presentacion-de-la-Campana-Artemisa-contra-la-deforestacion.aspx> el día 12 de mayo de 2019.
- [23] Molina, J. M. (2005, 12 de septiembre). La neblina como fuente de agua: evaluación de su colección en el sur de los Andes colombianos, usando mallas de polipropileno. Universidad Nacional de Colombia, sede Palmira. Recuperado de <https://es.scribd.com/document/353811385/LA-NEBLINA-COMO-FUENTE-DE-AGUA-Evaluacion-de-su-coleccion-en-el-sur-de-los-Andes-colombianos-usando-mallas-de-polipropileno> el día 12 de abril de 2019.

# La interacción de la demanda de dinero en Colombia y los bonos soberanos: 2000-2018\*

## The interaction of demand for money in Colombia and sovereign bonds: 2000-2018

\* Este documento es el resultado de las actividades de investigación realizadas por los estudiantes en el semillero de finanzas dirigido por la economista María Constanza Torres Tamayo, y se constituye en un proyecto de investigación del programa de Economía.

JAVIER DELGADO<sup>1</sup> - MATEO CASTELLANOS<sup>1</sup> - MARÍA CONSTANZA TORRES TAMAYO<sup>2</sup> -  
ÁLVARO ANDRÉS PERDOMO<sup>2</sup> - ÁLVARO HERNANDO CHAVES<sup>2</sup>

1. Economistas de la Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería.

2. Profesores de planta del programa de Economía de la Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería.

javier.delgado-c@mail.escuelaing.edu.co - mateo.castellanos@mail.escuelaing.edu.co -

maria.torrest@escuelaing.edu.co - alvaro.perdomo@escuelaing.edu.co - alvaro.chaves@escuelaing.edu.co

Recibido: 17/01/2021 Aceptado: 20/02/2021

Disponibile en [http://www.escuelaing.edu.co/es/publicaciones\\_revista](http://www.escuelaing.edu.co/es/publicaciones_revista)

<http://revistas.escuelaing.edu.co/index.php/reci>

### Resumen

Se estiman los factores asociados a la demanda de dinero en Colombia desde una óptica keynesiana y se usan los rendimientos de los bonos como una *proxy* del costo de oportunidad. En el trabajo, además de incluir una variable que no se ha utilizado para los análisis empíricos en Colombia (rendimiento de los bonos), se hace una descomposición del costo de oportunidad a corto, mediano y largo plazo, así como una agregación de las tres. Los resultados de la estimación de la demanda por dinero mediante la técnica de mínimos cuadrados ordinarios (MCO) muestran que la demanda de dinero resulta ser poco sensible a los cambios en los costos de oportunidad. Aumentos en el impuesto a los movimientos financieros generan un efecto sustitución sesgado a la tenencia de mayor liquidez, con el fin de realizar un mayor volumen de transacciones. Se encuentra una estimación importante de la elasticidad ingreso de la demanda de dinero y se podría sugerir que el dinero es un bien de lujo. La evidencia empírica indica que el motivo transacción es uno de los principales determinantes de la demanda de dinero.

**Palabras claves:** demanda de dinero, costo de oportunidad, bonos soberanos, plazo de los bonos.

**Clasificación JEL:** E12, E41.

### Abstract

This document estimates the demand for money in Colombia under a Keynesian perspective, taking bond yields as a proxy for the opportunity cost. The work, besides including a variable that has not been used for empirical analyzes in Colombia (bond yield), makes a breakdown of the opportunity cost in the short, medium, long term, and an aggregation of the three. The demand methodology is based on a simple econometrics methodology such as OLS (Ordinary Least Squares). The main results indicate that the demand for money is insensitive to the different opportunity costs.

## INTRODUCCIÓN

La demanda de dinero es la expresión de la sociedad por su preferencia de tener el bien más líquido en la economía. Keynes (1936) explica la existencia de esta demanda a partir de tres motivos, a saber: a) Motivo transacción, donde la sociedad prefiere tener liquidez para asegurar las transacciones económicas corrientes; b) motivo precaución, que señala que la gente prefiere guardar dinero para afrontar dificultades inesperadas que requieren gastos inusuales, y c) el motivo especulación, en el que los individuos prefieren tener dinero para generar ingresos aprovechando los movimientos del mercado.

De los anteriores motivos analizados en este trabajo interesa hacer énfasis en el motivo de tipo especulativo, toda vez que la demanda de dinero depende de un costo de oportunidad y que la demanda de liquidez se ve influenciada por el mercado de algunos bienes sustitutos. Esta segmentación de la demanda de dinero hace que la teoría keynesiana presente una ventaja frente a otras teorías alternativas de demandas por liquidez, lo que permite hacer explícita la distinción del efecto del nivel de ingreso (motivo transacción) y de los costos de oportunidad (motivo especulación) sobre la demanda de saldos reales de dinero.

La importancia de estudiar la demanda de dinero radica en que permite entender cuál es la trascendencia en el diseño de políticas monetarias por parte del banco central, las cuales se caracterizan por su capacidad de afectar otros agregados macroeconómicos, como el nivel de la demanda agregada, las tasas de interés y la inflación. Sin embargo, lo interesante no es analizar la demanda de dinero en sí misma, sino analizar su sensibilidad respecto a otras variables<sup>1</sup>, y si bien se han hecho muchos estudios empíricos de la influencia de la tasa de interés o el ingreso sobre la demanda de dinero<sup>2</sup>, no hay ninguna profundización de la relación entre la demanda de dinero y los bonos soberanos para el caso colombiano.

1. En los estudios de la demanda de dinero, principalmente se analizan sus determinantes. Por otro lado, en varios casos podría ser más sencillo hacer una política que afecte alguna variable que determine la demanda en lugar de afectar directamente la demanda de dinero.
2. Como en Hernández & Posada (2006), Ávila (2012) y Ordóñez, Melo & Parra (2018).

En este artículo se estudia la hipótesis sobre la inelasticidad de la demanda de dinero con respecto a otros activos menos líquidos en Colombia, como la tenencia de bonos. Dicho fenómeno tal vez se deba a que el dinero tiene muchos otros sustitutos en la demanda, y simultáneamente se requiere un importante poder adquisitivo para la obtención de los bonos.

El artículo se estructura en cinco secciones, de las cuales esta introducción es la primera. En la segunda sección se detallará lo que dice la teoría sobre la relación de la demanda de dinero y los bonos. En la tercera sección se describen los avances metodológicos y empíricos más relevantes de estudios sobre la demanda de dinero de Colombia. En la cuarta sección se destaca la metodología que permite hacer un análisis empírico. En la última sección se presentan las conclusiones.

## LA DEMANDA DE DINERO EN LA TEORÍA

Este artículo se basa en la concepción de la demanda de dinero desde la óptica keynesiana, destacando el hecho de que para Keynes es más razonable que la demanda de dinero esté afectada por el comportamiento especulativo y que una predicción solo por motivo transaccional sería algo inadecuado. Según Keynes, se demanda dinero por tres motivos:

- Motivo transacción, donde la sociedad prefiere tener liquidez para asegurar las transacciones económicas corrientes. Se entiende que mientras más transacciones haya en una economía, generalmente habrá un mayor nivel de ingresos; el movimiento de ambas variables tiene efectos de la misma proporción, por lo que esta última variable es determinante para la demanda de dinero.
- La segunda es motivo precaución, que señala que la gente prefiere guardar dinero para afrontar dificultades inesperadas, ya sea por la entrada o salida de saldos monetarios.
- Motivo especulación, donde los individuos prefieren tener dinero para generar ingresos, aprovechando los movimientos del mercado. Este postulado implica que el dinero tiene unos sustitutos (como activos financieros o activos reales), por lo que el volumen demandado del dinero dependerá del precio por la adquisición de los sustitutos y del rendimiento de los sustitutos. Este rendimiento se conoce como

costo de oportunidad<sup>3</sup> y se expresa como una tasa de interés.

En resumen, la cantidad demandada de dinero en términos reales se puede expresar como una función del nivel de ingresos (que explica el motivo transacción) y del costo de oportunidad (que pone de manifiesto el motivo especulación)<sup>4</sup>:

$$\frac{M}{P} = f\left(\overset{+}{y}, \overset{-}{i}\right) \quad (1)$$

Donde los signos encima de las variables indican la relación que existe entre la demanda por dinero con respecto al ingreso y el costo de oportunidad. Por ejemplo,  $\partial f / \partial y > 0$  indica que la demanda de dinero se incrementa cuando se aumenta el nivel de ingresos, mientras que la demanda de dinero se reduce cuando se incrementa el costo de oportunidad, es decir,  $\partial f / \partial i > 0$ .

En la práctica, pueden existir problemas al elegir la tasa de interés adecuada cuando se adopta este modelo; para solucionar este problema se deben considerar los sustitutos que se quieren analizar (si son activos financieros o reales y si tienen rendimientos a corto, mediano o largo plazo). Los activos reales son aquellos que corresponden a bienes tangibles (*commodities*, inmuebles, etc.), lo que implicaría que el costo de oportunidad dado por los activos reales se traduce en el mayor rendimiento que se deja de ganar por concepto de la variación de los precios de estos.

Básicamente, los activos financieros son títulos de deuda y sus rendimientos dependen del riesgo y del plazo de vencimiento del activo. Es aquí cuando se

3. En economía, el costo de oportunidad son los ingresos a los cuales se renuncia para reasignarlos a otra actividad económica. En el caso de economía monetaria, definimos el costo de oportunidad como el rendimiento más alto que se debe renunciar cuando se cuenta con varias alternativas y se decide por una opción determinada: mantener liquidez (Reina, Zuluaga, & Roza, 2006).
4. El motivo precaución no es fácilmente observable, razón por la cual los modelos teóricos keynesianos que definen una función de la demanda de dinero dependen únicamente del costo de oportunidad y del nivel de ingreso. En la práctica, los efectos no observables o medibles, como el motivo precaución, se ven explicadas por los choques estocásticos, los cuales se aproximan al residuo de una regresión econométrica.

hace necesaria una distinción del costo de oportunidad del dinero, considerando el plazo de vencimiento de la deuda. Esto se debe a las dinámicas que se pueden presentar entre la preferencia por tener más ganancias de los demandantes y por las tasas de preferencia intertemporal por dinero de estos.

Vale la pena señalar que este modelo teórico es compatible con aquellos que incluyen otras variables que afecten directamente el costo de oportunidad; por ejemplo: los impuestos o gravámenes a los movimientos financieros. Al ser más alta la tarifa de un impuesto a los movimientos financieros, hace que los demandantes de dinero perciban una reducción de su dinero introducido en el sistema financiero y, en consecuencia, que este impuesto sea considerado como un costo implícito de los sustitutos del dinero. Al aumentar la tarifa de dicho impuesto, podría generar una disminución en la demanda de los sustitutos más cercanos al dinero líquido porque son relativamente más costosos, lo que implicaría una mayor tenencia de dinero líquido, con el objeto de facilitar la realización de transacciones en la economía.

## REVISIÓN DE LA BIBLIOGRAFÍA

### Demanda de dinero para el caso colombiano

Existen varios estudios que estiman la demanda de dinero en función del nivel de ingresos y un costo de oportunidad. A continuación destacaremos los trabajos empíricos más relevantes para el caso colombiano.

En el trabajo de Gómez (1998) se estima la demanda de los saldos nominales de dinero (entendido como M1) para el periodo 1981: I-1997: IV, en función del nivel de precios, el nivel de ingresos, costo de oportunidad (entendido como la tasa de interés promedio de los CDT) y una variable denominada “innovación financiera” (aproximada en el estudio como una tendencia temporal<sup>5</sup>). De este trabajo se deben señalar dos espec-

5. Esta aproximación considera dos supuestos fuertes. En primer lugar, se considera que en todos los años se presenciaron innovaciones financieras (lo cual es muy probablemente cierto y, por lo tanto, estamos de acuerdo con esta afirmación). En segundo lugar, se considera que todas las innovaciones tienen el mismo efecto en la demanda de dinero, implicación que es una falacia; por esta razón, consideramos que metodológicamente una forma de incluir la innovación financiera sería la introducción de variables dicótomas que capten el efecto de las innovaciones más importantes.

tos metodológicos importantes: primero, la estimación tiene la restricción de que la función de demanda es homogénea de grado 1 para los precios, lo que implica que sí se tiene una función de la demanda de los saldos nominales de dinero  $M$ :

$$M = f(P, Y, R) \quad (2)$$

Se puede transformar en una función de los saldos reales de dinero  $m$  que no dependa del nivel de precios:

$$m = f(Y, R) \quad (3)$$

El segundo aspecto metodológico que hay que tomar en cuenta en este artículo consiste en que la estimación de la demanda de dinero se hizo con el método de cointegración (esto es, porque también se estimaron la demanda de la base monetaria y la función de velocidad del dinero). Estos dos detalles metodológicos hacen que la demanda de dinero contradiga la teoría para el periodo analizado (el efecto de la tasa de interés y del nivel de ingresos es el inverso del esperado). Como solución a este problema, Gómez propone incluir la innovación financiera, haciendo que la estimación sí corresponda a una demanda de dinero, ya que separa los efectos tendenciales de la demanda y los efectos generados por las variables regresoras.

Ordóñez, Melo y Parra (2018) estimaron la demanda de dinero (se utilizó  $M1$ ) para el periodo 1984-2016, con datos de frecuencia mensual; para este caso, se consideró que la demanda de dinero depende del nivel de precios, de los ingresos reales en la economía y de un costo de oportunidad (DTF). El aporte de Ordóñez, Melo y Parra consiste en una estimación con metodología no lineal (modelos de transición suave) y se encontraron los resultados señalados por la teoría: el nivel de precios incide en los saldos nominales de dinero demandados, en tanto que el nivel de ingresos también los impacta, y una mayor tasa de interés implica una reducción en los niveles demandados de dinero. Todas las variables fueron estadísticamente significativas y diferentes de cero.

El trabajo más completo para la demanda de dinero es el de Ávila (2012), puesto que en este se considera una gama de costo de oportunidad más amplia que los demás trabajos. Se estimó la demanda de dinero ( $M2$ ) para el periodo 2000-2010, en función del ingreso, nivel de precios y del costo de oportunidad (entendido como

DTF e IPVN), con datos trimestrales. Se encontró que la demanda de dinero no se ve afectada por el costo de oportunidad, mientras que el nivel de ingresos y el nivel de precios afectan la demanda de dinero de manera congruente con la teoría. Se concluyó que el dinero es un bien normal, debido a la inelasticidad ingreso de la demanda (se atribuye este resultado al tiempo trimestral de los datos), y se acepta la hipótesis de Friedman según la cual, debido al efecto nulo del costo de oportunidad sobre la demanda de dinero, la política monetaria debe enfocarse en controlar los agregados monetarios y no la tasa de interés, ya que así se tendría una mayor eficacia para el control de la inflación.

Se puede concluir que en Colombia no se ha considerado a los bonos como un sustituto del dinero, y por lo tanto no se ha evaluado el comportamiento de la demanda en función de un costo de oportunidad a largo plazo. El aporte de Ávila permite señalar que no es necesario considerar el costo de oportunidad dado por activos reales, ya que estos no tienen incidencia sobre la demanda de dinero.

### Demanda de dinero en otros países

En otros países se ha considerado el rendimiento de los bonos para estimar la demanda de dinero a largo plazo. Hamdi, Said y Sbia (2015) estimaron la demanda de dinero para seis países de Oriente Próximo (Baréin, Kuwait, Omán, Arabia Saudita, los Emiratos Árabes Unidos y Catar), utilizando el rendimiento de los bonos de las respectivas naciones como costo de oportunidad. Como tendencia general, encontraron que el nivel de ingresos es la variable que tiene mayor influencia sobre la demanda de dinero, el costo de oportunidad es estadísticamente significativo y diferente de cero para Baréin, Arabia Saudita, los Emiratos Árabes Unidos y Catar (a pesar de estos resultados, la demanda de dinero de estos países muestra una fuerte inelasticidad respecto al rendimiento de los bonos). Además, Hamdi, Said y Sbia estimaron la demanda de dinero en datos de panel; en este caso, encontraron que el nivel de ingresos y el costo de oportunidad son estadísticamente significativos y con signos iguales a la teoría. Otro ejemplo de la estimación de la demanda de dinero, considerando el rendimiento de los bonos como costo de oportunidad, se evidencia en el trabajo de Dodzi, Enu y Opoku (2014), cuyos resultados indicaban que los signos coinciden con los

señalados por la teoría, pero solo el nivel de ingresos se mostraba estadísticamente significativo.

Estados Unidos tiene numerosos estudios sobre la demanda de dinero considerando diferentes tasas de interés (por ejemplo, el rendimiento de los bonos) como costo de oportunidad. Chow (1966) estimó la demanda de dinero para Estados Unidos para el periodo 1897-1958 a corto y a largo plazo. Sus resultados señalan que la influencia del costo de oportunidad y el nivel de ingresos son estadísticamente significativos a corto y largo plazo. Estas características de la demanda de dinero de Estados Unidos se mantuvieron en el transcurso del tiempo. Arnold y Roelands (2010) reprodujeron los resultados anteriormente expuestos con una metodología de panel de datos (considerando varios hogares a lo largo del tiempo), para el periodo 1977-2008.

En ambos estudios se tomó en cuenta el rendimiento de activos reales, y se halló que esta variable actúa como un costo de oportunidad estadísticamente significativo y diferente de cero, resultado que contrasta con el caso colombiano, el cual se muestra invariable al considerar esta variable, como se evidencia en el trabajo de Ávila. A pesar de la significancia estadística, la demanda de dinero de Estados Unidos se muestra inelástica en relación con cualquier costo de oportunidad.

Para el caso de América Latina, predomina el uso de tasas de interés a corto plazo para las estimaciones de la demanda de dinero, lo que implicaría que las estimaciones de demandas a largo plazo no resultarían precisas. En el trabajo de Carrera (2016), se comparan las demandas de dinero de quince países de América Latina (Argentina, Bolivia, Brasil, Chile, Colombia, Costa Rica, Ecuador, Guatemala, Honduras, México, Paraguay, Perú, República Dominicana, Uruguay y Venezuela). En los resultados se puede destacar que la estimación para Argentina, Paraguay y Uruguay no puede considerarse como una demanda de dinero, puesto que ni el costo de oportunidad ni el nivel de ingresos son variables estadísticamente significativas. El costo de oportunidad es estadísticamente significativo para la mitad de los países (Bolivia, Costa Rica, Ecuador, Guatemala, México, República Dominicana y Venezuela), aunque en todos estos se perciba una inelasticidad de la demanda. Los países analizados en su conjunto, con una metodología de panel de datos, muestran una demanda de dinero influenciada por el costo de oportunidad y el nivel de ingresos.

Como conclusión, podemos deducir que existe una tendencia empírica que señala que el principal determinante de la demanda de dinero es el nivel de ingresos, explicado en este trabajo como el motivo transacción. No hay un consenso sobre la significancia estadística que tiene el costo de oportunidad sobre la demanda de dinero; sin embargo, todas las demandas de dinero se muestran inelásticas respecto a esta variable. Los casos analizados en panel de datos registran una significancia estadística para todas las variables.

## ESTIMACIÓN Y ANÁLISIS EMPÍRICO

### Método de estimación

Los motivos para la demanda de liquidez que se pueden cuantificar de una manera sencilla son el motivo transacción (se utiliza el nivel de ingresos como *proxy*) y el motivo especulación, donde se tiene en cuenta una tasa de interés que es el costo de oportunidad de conservar una fracción de la riqueza como dinero. Para efectos de este artículo, se hace una descomposición para el costo de oportunidad en tres plazos:

- Títulos de deuda cuya duración es inferior a 1 año (corto plazo).
- Títulos de deuda con un plazo entre 1 y 5 años (mediano plazo).
- Títulos de deuda cuyo plazo será mayor de 5 años (largo plazo)<sup>6</sup>.

Así mismo, se considerará una tasa de interés externa para el modelo, puesto que los individuos que tienen el suficiente poder adquisitivo para adquirir bonos internos también tienen la capacidad de comprar bonos del exterior. Esta última variable debe estar acompañada de la variación del tipo de cambio, porque el rendimiento de los bonos externos se puede ver sesgado por los movimientos de la tasa de cambio (la apreciación/depreciación puede aumentar, neutralizar o disminuir los rendimientos externos). Considerar la variación de la tasa de cambio también puede ser útil por su intrínseca influencia especulativa sobre la demanda de dinero. Los activos reales no se tendrán en cuenta, ya que estos no

6. Esta división permitiría analizar las preferencias de las personas por los bonos, según su plazo de vencimiento.

tienen una influencia importante sobre la demanda de dinero para el caso colombiano (Ávila, 2012).

La metodología más adecuada para este artículo consiste en un modelo de regresión estimado con la técnica de mínimos cuadrados ordinarios, donde el logaritmo de los saldos reales de dinero<sup>7</sup> estará en función del logaritmo del nivel de ingresos ( $Y_t$ ), el costo de oportunidad según el plazo, la tasa de interés externa ( $i^*$ ), la variación del tipo de cambio ( $\Delta e_t$ ) (que representan los rendimientos externos) y un impuesto a los movimientos financieros ( $t_{ft}$ ). Además, se estimarán otros tres modelos adicionales que capturen el efecto conjunto de los costos de oportunidad a corto ( $R_{b1t}$ ), mediano ( $R_{b2t}$ ) y largo plazo ( $R_{b3t}$ ), así como el costo de oportunidad externo (ecuaciones 5, 6 y 7, respectivamente).

El tratamiento estacional de las variables se basa en la introducción de variables binarias o *dummy*, las cuales son  $q_1, q_2, q_3$  y  $q_4$ , que toman el valor de 1 cuando la observación pertenece a la estación  $k$ , y 0 en caso contrario. Dichas variables binarias permitirán captar los movimientos estacionales en la demanda de dinero.

$$\log\left(\frac{M_t}{P_t}\right) = \beta_1 \log(Y_t) + \beta_2 \log(1 + R_{b1t}) + \beta_3 \log(1 + R_{b2t}) + \beta_4 \log(1 + R_{b3t}) + \beta_5 \log(1 + i^*_t) + \beta_6 \Delta e_t + \beta_7(t_{ft}) + \beta_8 q_{1t} + \beta_{10} q_{3t} + \beta_{11} q_{4t} + u_t \quad (4)$$

$$\log\left(\frac{M_t}{P_t}\right) = \beta_1 \log(Y_t) + \beta_2 \log(1 + R_{b1t}) + \beta_3 \log(1 + i^*_t) + \beta_4 \Delta e_t + \beta_5(t_{ft}) + \beta_6 q_{1t} + \beta_7 q_{2t} + \beta_8 q_{3t} + \beta_9 q_{4t} + u_t \quad (5)$$

$$\log\left(\frac{M_t}{P_t}\right) = \beta_1 \log(Y_t) + \beta_2 \log(1 + R_{b2t}) + \beta_3 \log(1 + i^*_t) + \beta_4 \Delta e_t + \beta_5(t_{ft}) + \beta_6 q_{1t} + \beta_7 q_{2t} + \beta_8 q_{3t} + \beta_9 q_{4t} + u_t \quad (6)$$

7. Se utiliza una especificación econométrica, en la que la variable dependiente es el logaritmo de la demanda por saldos reales. Esto tiene la ventaja de interpretar los parámetros estimados como elasticidades del dinero con respecto a cada uno de sus determinantes.

$$\log\left(\frac{M_t}{P_t}\right) = \beta_1 \log(Y_t) + \beta_2 \log(1 + R_{b3t}) + \beta_3 \log(1 + i^*_t) + \beta_4 \Delta e_t + \beta_5(t_{ft}) + \beta_6 q_{1t} + \beta_7 q_{2t} + \beta_8 q_{3t} + \beta_9 q_{4t} + u_t \quad (7)$$

El término de error,  $u_t$ , incorpora los efectos de variables no observadas o medibles, especialmente el motivo precaución.

La cadena de efectos que se quiere estudiar y cuantificar a partir de la econometría con las especificaciones descritas anteriormente es la siguiente: un impuesto a los movimientos financieros<sup>8</sup> induce a la gente a incrementar la demanda de uno de los dos componentes del agregado M3 (en este caso, el efectivo) y disminuir la demanda por depósitos bancarios, cuyo uso en el proceso de transacciones hace que se generen dicho impuesto y un costo adicional para el usuario. En el caso de la ecuación de la demanda por saldos reales, el incremento en la tasa de interés producirá una sustitución a tener menos efectivo o activos con menor rendimiento que los bonos. De este modo, la cuantificación de estos factores hace énfasis en los efectos sustitución entre dinero y otros sustitutos cercanos, como los depósitos en poder del público, y no centrar el análisis en el desplazamiento que podría sufrir la demanda de dinero<sup>9</sup>.

De esta manera, el impacto de un incremento del gravamen financiero implicará un aumento en la tenencia de dinero líquido, por lo que se espera que el signo de los parámetros estimados  $\beta_7$  y  $\beta_5$  sea positivo. Lo anterior permitiría una mejor comprensión de la hipótesis que se va a estudiar y evitar problemas de tipo conceptual.

8. El gravamen a los movimientos financieros (GMF) es un impuesto indirecto del orden nacional que se aplica a las transacciones financieras realizadas por los usuarios del sistema. La base gravable del GMF está integrada por el valor total de la transacción financiera mediante la cual se dispone de los recursos.
9. Gráficamente, esto equivale a estimar el efecto sustitución entre dinero y activos menos líquidos, inducidos por aumentos en la tasa de interés o el efecto del impuesto visto gráficamente como movimientos a lo largo de la curva de demanda por liquidez.

**Datos y fuentes de información**

Para este trabajo nos apoyamos en tres fuentes de información importantes: el Banco de la República (2019), el DANE (2019) y la revista *Expansión* (2019)<sup>10</sup>.

La fuente del Banco de la República suministra la serie del agregado monetario, el índice de precios al consumidor y la tasa de interés internas. El agregado monetario adecuado para la investigación es M3, porque es la variable que contiene los bonos. El índice de precios al consumidor (IPC) será la mejor aproximación al nivel de precios de una economía. La tasa DTF definirá el costo de oportunidad a corto plazo, en tanto que el rendimiento de los bonos determinará el costo de oportunidad a mediano y largo plazo<sup>11</sup>. La tasa de depreciación/apreciación se calcula con base en los datos del Banco de la República. El Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE) proporciona la serie no desestacionalizada del nivel de ingresos<sup>12</sup>. Esta expansión proporciona la serie histórica de los tipos de interés de la reserva federal. Los datos del impuesto conocido como 4 x 1000 fueron tomados del trabajo de Montaña (2019) tomando los datos con una periodicidad trimestral.

**Análisis descriptivo de las variables**

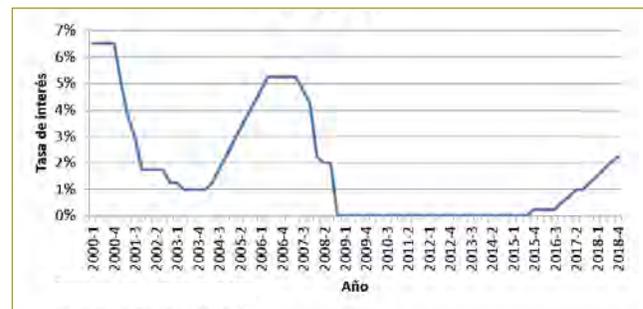
Con el análisis descriptivo (tabla 1) se notan características interesantes de las variables. Los costos de oportunidad muestran un comportamiento similar, pero la volatilidad (medida por la desviación estándar o la diferencia entre el dato mayor y el menor) y el nivel de la variable son más amplios cuando se trata de un costo de oportunidad a más largo plazo que otro. La

variación de la tasa de cambio es la variable más fluctuante de todas en relación con su media, pero registra un comportamiento con media cercana a cero y con picos y valles con magnitudes comparables entre sí. Además, las estadísticas muestran que el gravamen a los movimientos financieros permanece estable en el periodo observado.

**Tabla 1**  
Estadísticas descriptivas de las variables n = 76

| Variable | Media    | Desviación estándar | Mínimo   | Máximo   |
|----------|----------|---------------------|----------|----------|
| i*       | 1,71%    | 3,02%               | 0%       | 6,50%    |
| Y        | 152103,3 | 44580,67            | 71309,63 | 215975,3 |
| tf       | 0,38%    | 0,05%               | 0,20%    | 0,40%    |
| Rb1      | 6,81%    | 2,60%               | 3,47%    | 13,28%   |
| Rb2      | 8,42%    | 3,68%               | 4,96%    | 15,10%   |
| Rb3      | 10,38%   | 4,07%               | 5,02%    | 17,27%   |
| De       | 0,50%    | 6,48%               | -18,53%  | 17,12%   |
| M3       | 223707,4 | 141426              | 58354    | 504404   |
| IPC      | 69,973   | 16,64               | 41,934   | 100      |

Fuentes: Banco de la República (2019), *Expansión* (2019), DANE (2019) y Cálculos propios.



**Figura 1.** Tasa FED.

Fuente: *Exánsión* (2019).

- 10. *Expansión* es una revista mexicana enfocada en la economía, las finanzas y los negocios. Fundada en 1966, sus publicaciones tienen una frecuencia quincenal.
- 11. Como existen bonos cuyo plazo de vencimiento corresponde a periodos intermedios, se estima el rendimiento de los bonos por promedio ponderado, considerando el valor total de los bonos. Para más detalle, ver los anexos.
- 12. La idea de usar la serie del PIB original, es decir, sin desestacionalizar, es para hacerla compatible con la variable de interés que es el agregado monetario M3, la cual se caracteriza por mostrar importantes movimientos estacionales, sobre todo a finales de año, donde tiende a incrementarse por la época de diciembre.

La Reserva Rederal (Fed) de Estados Unidos, desde la crisis del 2008, tomó la decisión de disminuir la tasa de interés, con el fin de que la economía se pueda reactivar con un aumento del consumo por parte de los agentes.

El producto interno bruto (PIB) muestra la demanda de bienes finales producidos en Colombia. Si bien registra un crecimiento, no es el esperado para la economía nacional, debido a que muchos de los sectores involucrados en la producción interna no crecen al ritmo esperado, a causa de situaciones internas o externas que sufre la economía local.



Figura 2. PIB trimestral - serie original.

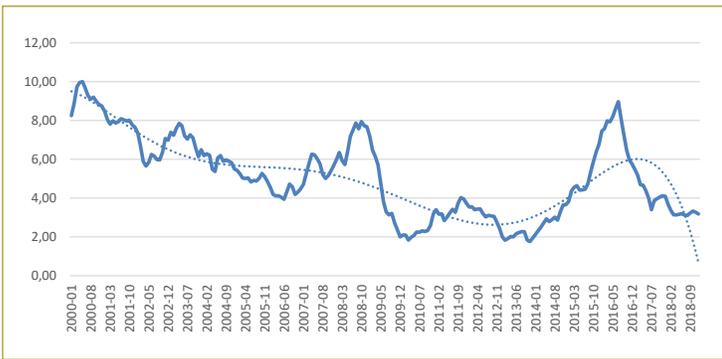


Figura 3. Inflación anual del índice de precios al consumidor (IPC).  
Fuente: Banco de la República (2019).

La inflación anual del índice de precios al consumidor (IPC) presenta una tendencia decreciente a lo largo del periodo de análisis, al igual que algunos ciclos marcados que reflejan factores macroeconómicos internos y externos que afectaron el comportamiento de la inflación<sup>13</sup>.

La base de los saldos nominales está explicada por el agregado monetario M3, que contempla la suma de M2 (los cuasidineros están compuestos por los depósitos de ahorro y los certificados de depósito a término, en todos los plazos y condiciones de indexación más M1 que contienen el efectivo y los depósitos) más los depósitos fiduciarios, los depósitos a la vista y los bonos. A continuación se muestra que para después del periodo del 2010 la demanda monetaria se ha incrementado en mayor proporción que en los diez años anteriores (figura 5).

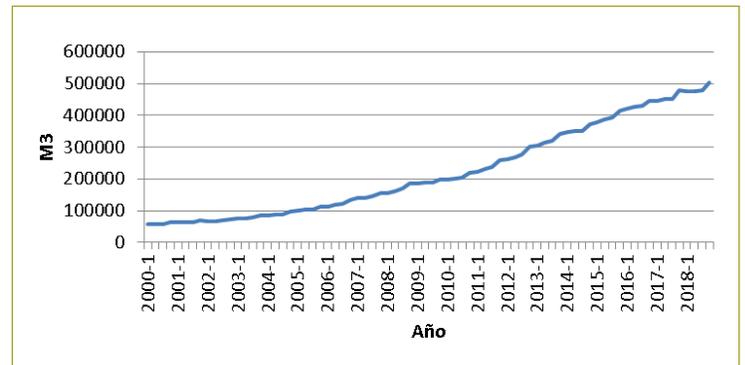


Figura 4. Saldos nominales de dinero.  
Fuente: Banco de la República (2019).

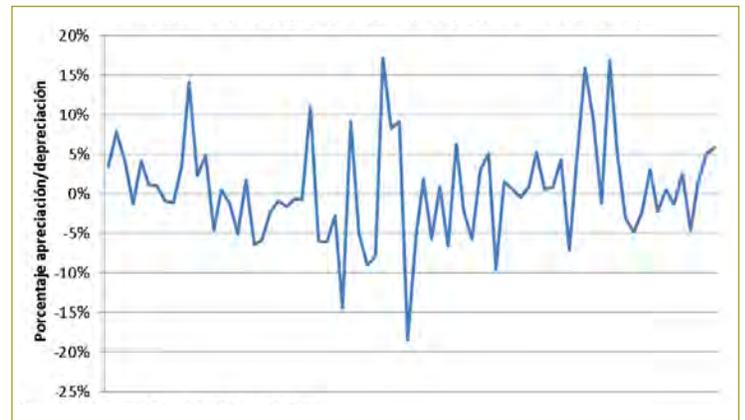


Figura 5. Variación del tipo de cambio (2000:I - 2018:IV).  
Fuente: Banco de la República (2019).

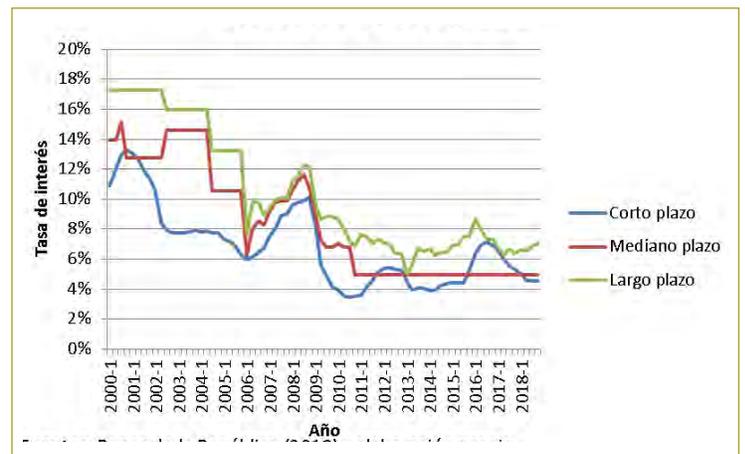


Figura 6. Costos de oportunidad.  
Fuente: Banco de la República (2019) y elaboración propia.

13. Cabe resaltar que la tasa de inflación que comúnmente se utiliza para analizar el costo de vida en una economía se obtiene como la variación porcentual del Índice de Precios al Consumidor – IPC.

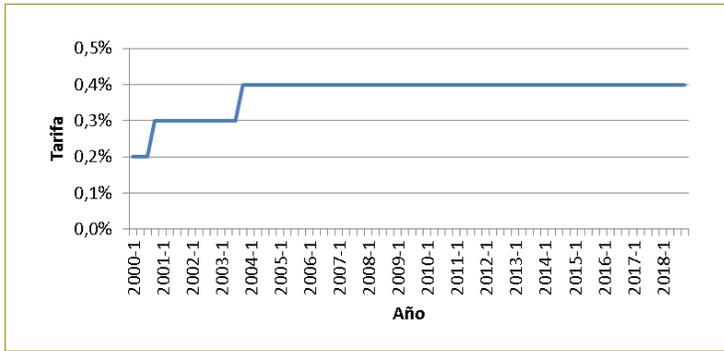


Figura 7. GMF.

Fuente: Montañas, 2019.

El gravamen a los movimientos financieros (GMF) nace para solventar la crisis financiera interna que afrontaba el país para finales de los años noventa y principios de la década de los dos mil. En la figura siguiente se puede apreciar muy poca variación a lo largo del tiempo; solo experimenta dos aumentos a comienzos de los años dos mil: la consolidación como un impuesto permanente, conocido como el 2 x 1000, e incremento al 3 x 1000 unos meses más tarde. En el año 2003, se aumentó mediante la aplicación de la Ley 863, que conocida normalmente como el 4 x 1000.

### Estimación y análisis empírico<sup>14</sup>

En la tabla siguiente (tabla 2) se muestran los resultados de la estimación de los cuatro modelos de demanda por liquidez propuestos en el marco metodológico, los cuales presentan un comportamiento muy parecido en cuanto a la incidencia del costo de oportunidad externo, el nivel de ingresos y la tasa de cambio. El costo de oportunidad, que tiene una incidencia significativa en todos los modelos, corresponde a la tasa de interés externa. La elasticidad del nivel de ingreso mayor que 1 nos indica que el dinero es un bien de lujo. En cuanto a la tasa de cambio, se puede concluir que esta variable no representa un costo de oportunidad para la demanda de dinero en Colombia, debido a que presenta un signo contrario al esperado y, además, es estadísticamente insignificante.

Si bien el costo de oportunidad a largo plazo muestra el signo señalado por la teoría económica, cumple con la misma característica que los otros tres modelos: no es estadísticamente significativo. Para el modelo a corto plazo, este fenómeno se puede explicar perfectamente por la alta incidencia del impuesto a los movimientos financieros (y quizás en parte para los otros), pero para los modelos a mediano y largo plazo la inelasticidad de la demanda se explica por el alto precio para la adquisición de los bonos.

Tabla 2  
Variable dependiente: logaritmo de saldos dinero

| Variable independiente | Modelo 1<br>Corto plazo | Modelo 2<br>Mediano plazo | Modelo 3<br>Largo plazo | Modelo<br>Completo |
|------------------------|-------------------------|---------------------------|-------------------------|--------------------|
| $\log(1+i^*)$          | -3,197***               | -3,248***                 | -3,184***               | -3,074***          |
| $\log(Y)$              | 1,263***                | 1,262***                  | 1,256***                | 1,403***           |
| Tf                     | 1,112**                 | 1,151***                  | 1,102***                | 0,406**            |
| $\log(1+Rb1)$          | 0,657                   |                           |                         | 0,868              |
| $\log(1+Rb2)$          |                         | 0,265                     |                         | -0,086             |
| $\log(1+Rb3)$          |                         |                           | -0,201                  | 0,168              |
|                        | 0,032                   | 0,029                     | 0,03                    | 0,029              |
| q1                     | -0,026***               | -0,026***                 | 0,009***                | -0,029***          |
| q2                     | -0,038***               | -0,036***                 | -1,105***               | -0,034***          |
| q3                     | -0,042***               | -0,043***                 | -0,007***               | -0,042***          |
| q4                     | -1,138***               | -1,105***                 | 0,038***                | -1,042***          |
| No, Obs                | 76                      | 76                        | 76                      | 76                 |
| R cuadrado             | 0,932                   | 0,941                     | 0,938                   | 0,943              |

Fuente: Estimaciones propias a partir de cifras del Banco de la República (2019). *Expansión* (2019) y DANE (2019).

14. Pruebas econométricas en los anexos.

El modelo completo, el modelo a corto plazo y el modelo a mediano plazo presentan una estacionalidad importante en el cuarto trimestre que reduce la demanda de dinero. Para el caso del modelo a largo plazo, este efecto se percibe en el segundo trimestre.

## CONCLUSIONES

Como se puede observar en los resultados, vemos que con un aumento en el GMF a las personas, estas van a desear tener más dinero en su poder y ejecutar las transacciones de la forma más líquida posible, para evitar el impuesto.

Se concluye, entonces, que el dinero es un bien de lujo debido a su alta elasticidad de ingreso, haciendo que el motivo transacción sea el determinante más influyente sobre el comportamiento de la demanda de dinero.

Los costos de oportunidad internos no son estadísticamente significativos. Esta insensibilidad puede explicarse por el impuesto a los movimientos financieros y por el alto precio para la adquisición de los bonos.

Los individuos no utilizan las divisas como mecanismo sustituto a la tenencia de dinero, como se puede observar en los resultados, aunque no son significativos estadísticamente. También es posible observar que, para el cuarto trimestre en los modelos a corto y mediano plazo, y en el modelo completo, hay una salida de dinero que corresponde a las fechas de mayores gastos.

## REFERENCIAS

- Arnold, I., & Roelands, S. (2010). Housing wealth and U.S. money demand: a panel estimation. *Contemporary Economic Policy*, 382-391.
- Ávila, H. S. (2012). Comportamiento de la demanda de dinero en Colombia durante el periodo 2000:I - 2010:IV. *Apuntes del Cenes*, 125-163.
- Banco de la República (2019). *Estadísticas: Banco de la República*. Recuperado el 20 de abril de 2019, del sitio web del Banco de la República: <http://www.banrep.gov.co/es/-estadisticas>
- Carrera, C. (2016). Demanda de dinero a largo plazo en los países de América Latina: un enfoque de datos de panel no estacionarios. *Monetaria*, 132-164.
- Chow, G. (1966). On the long-run and short-run demand for money. *Journal of Political Economy*, 111-131.
- DANE (2019, junio). *DANE*. Obtenido de DANE: <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/cuentas-nacionales/cuentas-nacionales-trimestrales>.
- Dodzi, E., Enu, P., & Opoku, E. (2014). Demand for money and long run stability in Ghana: cointegration approach. *European Scientific Journal*, 483-495.

- Expansión* (2019). *Tipos de la Reserva Federal de Estados Unidos: datos macro*. Recuperado el 20 de abril de 2019, de *Expansión* portal web: <https://datosmacro.expansion.com/tipo-interes/usa>.
- Gómez, J. (1998). La demanda de dinero en Colombia. *Banco de la República*, 1-30.
- Hamdi, H., Said, A., & Sbia, R. (2015). Empirical evidence on the long-run money demand function in the Gulf Cooperation Council Countries. *Internacional Journal of Economics and Financial Issues*, 603-612.
- Hernández, M., & Posada, C. (2006). Demanda por dinero en Colombia: un poco más de evidencia en el periodo reciente. *Perfil de Coyuntura Económica*, 75-88.
- Keynes, J. (1936). *The general theory of employment, interest and money*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Laidler, D. (1997). *La demanda de dinero*. Barcelona: Bosch Antoni, Editor.
- Montaña, C. (2019, mayo). *BBVA*. Obtenido de BBVA: <https://www.bbva.com/es/co/4-x-1000-que-es-y-cuales-son-los-mitos-de-este-impuesto-en-colombia/>.
- Ordóñez, D., Melo, L., & Parra, D. (2018). Una exploración reciente a la demanda por dinero en Colombia bajo un enfoque no lineal. *Revista de Economía del Rosario*, 5-37.
- Reina, M., Zuluaga, S., & Rozo, M. (2006). *El dinero y la política monetaria*. Bogotá: Banco de la República.

## ANEXO A: METODOLOGÍA PARA LA ESTIMACIÓN DEL RENDIMIENTO DE LOS BONOS

Existen varios plazos intermedios y rendimientos diferentes para cada rango de análisis de los bonos. La cantidad emitida de estos bonos también es diferente, por lo que se requiere una metodología para estimar un rendimiento representativo. A manera de ejemplo, se consideran los siguientes bonos que simbolizan el costo de oportunidad a mediano plazo (tabla 3).

**Tabla 3**  
Ejemplo emisión de bonos (mediano plazo)

| Plazo | Rendimiento | Valor total emitido |
|-------|-------------|---------------------|
| 1     | R1          | V1                  |
| 2     | R2          | V2                  |
| 2     | R3          | V3                  |
| 3     | R4          | V4                  |
| 4     | R5          | V5                  |
| 5     | R6          | V6                  |
| 5     | R7          | V7                  |

Fuente: elaboración propia.

Para calcular el rendimiento de los bonos se procede a hacer un promedio ponderado, considerando el valor total emitido como ponderador, es decir:

$$R_b = \frac{\sum R_i V_i}{\sum V_i} \quad (12)$$

Este valor estimado solo se verá modificado cada vez que haya una nueva emisión.

## ANEXO B: PRUEBAS ECONÓMICAS

La prueba de *multicolinealidad* que se usó se basa en el cálculo del factor de inflación de la varianza, el cual se estima en 8,70. Esto significa que las variables regresoras son linealmente independientes entre sí, lo que implicaría que no habría sesgos en los estimadores por causa de la multicolinealidad (tabla 4).

**Tabla 4**  
Test de multicolinealidad

| Variable   | VIF   | 1/VIF    |
|------------|-------|----------|
| i*         | 1,98  | 0,505051 |
| Y          | 10,84 | 0,092251 |
| tf         | 2,84  | 0,352113 |
| Rb1        | 4,5   | 0,222222 |
| Rb2        | 15,36 | 0,065104 |
| Rb3        | 24,28 | 0,041186 |
| $\Delta e$ | 1,13  | 0,884956 |
| Media VIF  | 8,7   |          |

Fuente: elaboración propia.

Como se puede apreciar, el VIF de 8,7 es para el modelo completo; sin embargo, con la anterior tabla se puede calcular el factor de inflación de la varianza promedio de los modelos restantes, los cuales tampoco presentan multicolinealidad.

En la tabla siguiente (tabla 5) se pueden apreciar las restantes pruebas econométricas pertinentes para todos los modelos. Para verificar el comportamiento normal de los errores nos basaremos en la prueba de sesgo y curtosis para determinar la normalidad de los errores.

$$H_0 = \text{Errores se distribuyen de manera normal}$$

El criterio de decisión se basa en la comparación de un  $X_i^2$  calculado y la tabla (o de la comparación entre probabilidad y el nivel de significancia). En caso de que se rechace la hipótesis nula, se hace un tratamiento a los

valores atípicos para normalizar los residuos. Después de dicho proceso se puede observar que la probabilidad es superior al 5 %, lo que implicaría que se acepta la hipótesis nula para todos los modelos (esta decisión se dio después de la normalización que tuvo que hacerse, puesto que previamente los modelos no mostraban un comportamiento normal de los errores).

Para evaluar la *autocorrelación* hay que basarse en dos pruebas estadísticas: test de Durbin & Watson (para valorar la autocorrelación de primer orden) y prueba Breusch-Godfrey (para encontrar la existencia de autocorrelación serial). Para ambas pruebas estadísticas la hipótesis nula consiste en la existencia de autocorrelación (ya sea de primer orden o serial, esto depende de la prueba).

$$H_0 = \text{Existe autocorrelación}$$

La hipótesis nula en Durbin & Watson se rechaza cuando el estadístico DW está en el intervalo (1,8-2,2)<sup>15</sup>. El criterio de evaluación para la prueba Breusch-Godfrey consiste en la comparación de un  $X_i^2$  calculado y la tabla (o de la comparación entre la probabilidad y el nivel de significancia). Si el  $X_i^2$  calculado es menor que el de la tabla (o la probabilidad es mayor que el nivel de significancia), se aceptará la hipótesis nula. Para subsanar la autocorrelación, se seguirá el método Cochrane-Orcutt y se vuelve a evaluar la autocorrelación con las pruebas estadísticas antes mencionadas.

En este caso, fue necesario corregir la autocorrelación de los modelos (en la tabla 5 se muestran el estadístico DW y el  $p$  valor de la prueba Breusch-Godfrey de los modelos después de subsanar la autocorrelación).

La prueba para la verificación de *homocedasticidad* utilizada acá es la de Breusch-Pagan, la cual se basa en la siguiente hipótesis nula:

$$H_0 = \text{Varianza constante}$$

15. No siempre es así. Este criterio de comparación depende del número de observaciones y del número de variables regresoras. En la práctica, todos los modelos estimados tienen un intervalo de decisión más amplio; solo se consideró un rango más estrecho (siempre y cuando esté contenido en los intervalos de decisión de todos los modelos), con el objetivo de hacer comparable el criterio de decisión en todos los modelos.

Y el criterio de decisión se basa en la comparación de un  $F$  calculado y la tabla (o de la comparación entre probabilidad y el nivel de significancia). Si la probabilidad es mayor que el 5 % se acepta la hipótesis nula. Se puede apreciar que el modelo completo presenta heterocedasticidad. Para corregir este problema, el método de estimación mostrado en el trabajo será el de mínimos cuadrados generalizados (MCG). La estimación por MCG muestra el mismo valor de los estimadores que la metodología MCO, pero hace un debido ajuste en los intervalos de confianza y, por ende, en la significancia individual de las variables. La corrección de la heterocedasticidad se evidencia en la disminución del Root-MSE.

**Tabla 5**  
Otras pruebas econométricas

| Estadístico       | Modelo 1 Corto plazo | Modelo 2 Mediano plazo | Modelo 3 Largo plazo | Modelo completo |
|-------------------|----------------------|------------------------|----------------------|-----------------|
| DW                | 1,886                | 1,858                  | 1,876                | 1,977           |
| BG (p valor)      | 0,704                | 0,593                  | 0,633                | 0,949           |
| Sktest ( p valor) | 0,99                 | 0,792                  | 0,959                | 0,19            |
| BP (p valor)      | 0,13                 | 0,122                  | 0,109                | 0,045           |
| Root MSE MCO      |                      |                        |                      | 0,021           |
| Root MSE MCG      |                      |                        |                      | 0,019           |

Fuente: elaboración propia.

# REVISTA DE LA ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA

## Alcance y política

El objetivo de la *Revista de la Escuela Colombiana de Ingeniería* es difundir artículos técnicos que contribuyan al desarrollo del país a través de una publicación con alta calidad editorial y rigor científico.

La revista acepta prioritariamente los siguientes tipos de trabajos, que le permiten mantener su categorización:

1. **Artículo de investigación científica y tecnológica.** Documento que presenta, de manera detallada, los resultados originales de proyectos de investigación. La estructura generalmente utilizada contiene cuatro apartes importantes: introducción, metodología, resultados y conclusiones.
2. **Artículo de reflexión.** Documento que presenta resultados de investigación desde una perspectiva analítica, interpretativa o crítica del autor, sobre un tema específico, recurriendo a fuentes originales.
3. **Artículo de revisión.** Documento producto de una investigación donde se analizan, sistematizan e integran los resultados de investigaciones publicadas o no publicadas, sobre un campo en ciencia o tecnología, con el fin de dar cuenta de los avances y las tendencias de desarrollo. Se caracteriza por presentar una cuidadosa revisión bibliográfica.

También admite artículos de las siguientes tipologías:

4. **Artículo corto.** Documento breve que presenta resultados originales preliminares o parciales de una investigación científica o tecnológica, que por lo general requieren una pronta difusión.
5. **Reporte de caso.** Documento que presenta los resultados de un estudio sobre una situación particular, con el fin de dar a conocer las experiencias técnicas y metodológicas consideradas en un caso específico.
6. **Revisión de tema.** Documento resultado de la revisión crítica de la bibliografía sobre un tema en particular.

Cabe destacar que se privilegian para la revista los tipos de artículos de los numerales 1, 2 y 3.

La revista circula trimestralmente y recibe sólo artículos inéditos. Los trabajos recibidos se someten al concepto de pares académicos y del Consejo Editorial.

## Requisitos para la publicación de artículos

Los artículos presentados a la revista deben remitirse por correo electrónico a [revista@escuelaing.edu.co](mailto:revista@escuelaing.edu.co), adjuntando los siguientes formatos debidamente diligenciados: autor.doc, clasificación.doc y tipo.doc, cuyos archivos se pueden descargar de <http://www.escuelaing.edu.co/revista.htm>. En este mismo sitio está disponible la plantilla guía que contiene la estructura determinada por la revista para los artículos.

## Scope and policy

*Revista de la Escuela Colombiana de Ingeniería* disseminates technology articles helping to our country development. It emphasises on its high quality print and its scientific rigour. Articles submitted for publication shall be classified into one of the following categories— which allow it keeps its indexation:

1. **Scientific and technological research article.** These documents offer a detailed description about the original findings of research projects. In general, the usually used structure contains four important sections: introduction, methodology, results and conclusions.
2. **Reflection article.** These documents present the results of a research project on a specific, interpretative, or critical view by the author about a particular topic by using original sources.
3. **Review.** A document resulting from a finished research, where the published and/or unpublished findings of investigation in a particular field of science or technology are analysed, systematised and integrated to report the progress and the development tendencies. These documents include a careful bibliographic review.

*Revista de la Escuela Colombiana de Ingeniería* also accepts the following types of articles:

4. **Short article.** A brief text presenting the original, preliminary and/or partial results of a scientific or technological study, which normally need to be disseminated as quickly as possible.
5. **Case report.** A document that presents the results of a study on a specific situation in order to report the technical and methodological experiences considered in a particular case.
6. **Thematic review.** These documents are the product of a critical review of literature on a particular topic.

Our revista privilege articles as the highlight ones in numbers 1, 2 and 3.

*Revista de la Escuela Colombiana de Ingeniería* is a quarterly publication that only accepts unpublished articles. The revista submits all the papers to the verdict of two academic peers, who evaluate the article.

## Ruling for publication

The article must be sent by e-mail to [revista@escuelaing.edu.co](mailto:revista@escuelaing.edu.co) with 3 files attached: Author.doc, Classification.doc and Type.doc available in <http://www.escuelaing.edu.co/revista.htm>. There is also a template guide for the structure of the article (template guide.doc).



**Confía en 4-72,**  
el servicio de envíos  
de Colombia

Línea de atención al cliente:  
**(57 - 1) 472 2000 en Bogotá**  
**01 8000 111 210 a nivel Nacional**

.....

[www.4-72.com.co](http://www.4-72.com.co)