



# Ingeciencia

Revista de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Básicas

ISSN: 2500-929X • Vol. 5, enero-diciembre de 2020

## Rector

Jaime Arias Ramírez

## Vicerrector académico

Óscar Leonardo Herrera Sandoval

## Vicerrectora administrativa y financiera

Paula Andrea López López

## Vicerrector de programas

Jorge Hernán Gómez Cardonas

*Ingeciencia* es la revista de investigación formativa de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Básicas.  
ingeciencia@ucentral.edu.co

## Director

Adolfo Naranjo Parra

## Editora

Leticia Fernández Marín

## Comité editorial

Adolfo José Naranjo Parra

Sandra Milena Gamboa Moreno

Aliex Trujillo García

Gastón Mejía Arias

Leticia Fernández Marín

Héctor Sanabria Rivera

© Ediciones Universidad Central

© Varios autores

Coordinación Editorial

Calle 21 n.º 5-84 (4.º piso). Bogotá, D. C., Colombia

Conmutador: 323 9868, ext.: 1556

[www.ucentral.edu.co/editorial](http://www.ucentral.edu.co/editorial)

## Editorial - CRAI

Héctor Sanabria R.

### Editor

Nicolás Rojas Sierra

### Gestor editorial

[lacentraldediseno.com](http://lacentraldediseno.com)

### Diseño y diagramación

Felipe Solano Fitzgerald

### Corrección de textos

**Imagen de cubierta:** Decantador de tres fases Tricanter®, utilizado para obtener aceites vegetales o animales y para el tratamiento de aguas residuales, entre otros usos, fabricado por Flottweg. Imagen tomada de <https://bit.ly/3vAMmZH>



Los contenidos de la revista *Ingeciencia* son publicados de acuerdo con los términos de la licencia Creative Commons 2.5. Usted es libre de copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato, siempre y cuando dé los créditos de manera apropiada, no lo haga con fines comerciales y no realice obras derivadas.

Las ideas aquí expresadas, lo mismo que su escritura, son exclusiva responsabilidad de los escritores y no comprometen a la Universidad Central ni a la orientación de la revista.

Distribución gratuita

## Contenido

Editorial ..... 5

Modelación en sistemas dinámicos del cambio del uso del suelo por cultivos de palma de aceite para producción de biodiésel en Colombia ..... 7  
Karen Solangie Torres Bernate, Laura Stephania Calderón Ruiz y Sandra Cecilia Bautista Rodríguez

Aplicación de GIS y AHP en la delimitación de zonas de recarga de acuíferos en áreas semiáridas en el departamento del Cesar ..... 24  
Andrés Felipe Arias Pérez

Modelo para la evaluación dinámica de la gestión de residuos peligrosos en Colombia y su aporte al cambio climático ..... 43  
Raiza Alexandra Jiménez Bermúdez, Karen Dayana Quilaguy Salamanca y Diana Alexandra Romero Carrillo

Infecciones respiratorias agudas (IRA) por efecto de las emisiones y escorrentía superficial de PM10 atribuidos al parque automotor en Bogotá ..... 57  
Angie Katherin Lache Peñaranda, Gabriel Ernesto Castelblanco Bolívar y Juan David Barón Prada

Evaluación de amenazas naturales asociadas al área de influencia de la bocatoma del municipio de Ubaté, Cundinamarca ..... 81  
Ana Silvia Duarte López, Lilia Juliana Marroquín Ojeda y Maritza Páez Silva

## Contents

Editorial ..... 5

Dynamic systems modeling of land use change by oil palm cultivation for biodiesel production in Colombia ..... 7  
Karen Solangie Torres Bernate, Laura Stephania Calderón Ruiz y Sandra Cecilia Bautista Rodríguez

Application of GIS and AHP in the delimitation of aquifer recharge zones in semi-arid areas in the department of Cesar ..... 24  
Andrés Felipe Arias Pérez

Dynamic evaluation model for hazardous waste management and it's contribution to climate change in Colombia ..... 43  
Raiza Alexandra Jiménez Bermúdez, Karen Dayana Quilaguy Salamanca y Diana Alexandra Romero Carrillo

IRA cases due to the effect of PM10 emissions and surface runoff attributed to the automotive park in Bogotá ..... 57  
Angie Katherin Lache Peñaranda, Gabriel Ernesto Castelblanco Bolívar y Juan David Barón Prada

Assessment of natural threats associated with the area of influence of the mouth of the municipality of Ubaté, Cundinamarca ..... 81  
Ana Silvia Duarte López, Lilia Juliana Marroquín Ojeda y Maritza Páez Silva

<p>Revisión bibliográfica del uso de coagulantes naturales como alternativa para el tratamiento de aguas residuales..... 95</p> <p>María Fernanda Ariza Ruiz y Lizeth Liliana Gutiérrez Vargas</p>	<p>Bibliographic review use of natural coagulants as an alternative for the treatment of wastewater ..... 95</p> <p>María Fernanda Ariza Ruiz y Lizeth Liliana Gutiérrez Vargas</p>
<p>Identificación de las principales áreas de recarga de acuíferos en la zona media del departamento del Cesar..... 109</p> <p>Ingrid Lorena Pinzón Pulido y Ángela Patricia Alfonso Palacios</p>	<p>Identification of the main aquifer recharge areas in the middle zone of the department of Cesar..... 109</p> <p>Ingrid Lorena Pinzón Pulido y Ángela Patricia Alfonso Palacios</p>
<p>Impacto potencial de la minería subterránea de carbón en los acuíferos del municipio de Suesca, Cundinamarca: modelo numérico..... 125</p> <p>Marlyn Adriana García Gutiérrez, Natalia Viviana Hernández Perdomo y Douglas Quintero</p>	<p>Potential impact of underground coal mining in the aquifers of the municipality of Suesca, Cundinamarca: a numerical model..... 125</p> <p>Marlyn Adriana García Gutiérrez, Natalia Viviana Hernández Perdomo y Douglas Quintero</p>
<p>Análisis del desempeño de una celda combustible tipo membrana de intercambio protónico escala banco.. 143</p> <p>Leidy Lorena Méndez Álvarez y Lyzed A. Toloza Blanco</p>	<p>Performance analysis of a proton exchange membrane fuel cell bench scale..... 143</p> <p>Leidy Lorena Méndez Álvarez y Lyzed A. Toloza Blanco</p>
<p>Mil palabras en acción ..... 159</p>	<p>A thousand words in action..... 159</p>

Apreciados lectores, les presentamos el volumen 5 de la revista *Ingeciencia*, órgano de divulgación de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Básicas de la Universidad Central. Esta publicación es una invitación a reflexionar, abrir la mente y dejar volar la imaginación.

Los seres humanos estamos acostumbrados a los procesos (vitales, económicos, naturales, etc.) que se desarrollan y se modifican de manera lineal en el tiempo. Es así como gradualmente crecemos, envejecemos, aprendemos, aumentamos nuestros ahorros e incluso observamos cómo la tierra se erosiona, siempre gradualmente. Por esta razón, cuando nos encontramos con procesos de crecimiento exponencial se nos dificulta comprenderlos y normalmente tendemos a subestimarlos. Un ejemplo proverbial de este fenómeno es el del famoso tablero de ajedrez, donde el héroe pide como premio al sultán un grano de trigo en la primera casilla del tablero, dos en la segunda, cuatro en la tercera, ocho en la cuarta, dieciséis en la quinta y así progresivamente hasta llegar a la casilla sesenta y cuatro del tablero. El sultán del relato consideró humilde (subestimó) esta solicitud, hasta que intentó cumplirla; el resultado terminó siendo una cantidad cercana a  $2^{64}$  granos de trigo. Como referencia de este número, cabe mencionar que Carl Sagan estimó que hay  $10^{22}$  estrellas en el universo.

En la naturaleza hay muchos procesos que crecen exponencialmente. Por ejemplo, el número de bacterias en una caja de Petri (con suficiente alimento) o la propagación de un virus en una población. Asimismo, en las ciencias y en el desarrollo tecnológico hay procesos que presentan este tipo de crecimiento. Tomemos como ejemplo la ley de Moore (promulgada en 1965), que más que una ley es un hecho social: “Cada 18-24 meses, los procesadores duplican su potencia, lo que permite mantener los costos”. Esta ley muestra el carácter exponencial del desarrollo digital. Otro ejemplo son las tecnologías exponenciales, que algunos expertos<sup>1</sup> definen como aquellas que mantienen el costo y mejoran a una tasa de más de 10% por año, durante varias décadas.

En el caso de la computación, a pesar de que la ley de Moore parece estar llegando a su límite con las tecnologías actuales, se vislumbra el potencial que genera la computación cuántica, una vez se convierta en el estándar de la industria. Actualmente se identifican cuatro dominios de la tecnología que conforman entre ellos la base de la economía mundial. La computación es uno de estos dominios, además de la energía, la biología y la manufactura. Además, las tecnologías relacionadas son *tecnologías de propósito general* (TPG), que tienen el potencial, al combinarse entre sí, de transformar radicalmente la sociedad.

En el caso de la energía, la eólica tuvo una reducción de costo del 70% en la década de 2010 a 2020, lo que representa una disminución aproximada de 13% por año. La energía

---

<sup>1</sup> A. Azhar, *The Exponential Age* (Diversión Publishing Corp., 2021).

solar pasó de un costo de US\$100 por vatio generado en 1975, a US\$0,23 en 2019. Esta fue una reducción de aproximadamente 500 veces. Pero aún más significativo es que la mayor parte de esta reducción se ha generado en la última década, donde el costo de la energía solar ha declinado 89%. Por su parte, lo que está sucediendo con el desarrollo de las baterías es otra dimensión de análisis.

En el caso de la biología, cabe considerar como ejemplo que el “borrador” inicial del primer genoma humano, secuenciado entre abril de 1999 y junio de 2000, tuvo un costo cercano a US\$300 millones y los ajustes posteriores demandaron otros US\$150 millones. De manera que decodificar ese primer genoma tuvo un costo aproximado de US\$500 millones. En contraste, la compañía BGI, en Shenzhen, anunció en marzo de 2020 que podía secuenciar un genoma completo en US\$100. Esto representa una reducción de costos de más de un millón de veces en veinte años. La ley de Moore palidece.

¿Cómo es posible esta reducción? En el campo de la biología, la respuesta ha sido combinar el poder de la computación, el avance de las tecnologías para producir reactivos, nueva electrónica y sensores más económicos (es decir, robótica que permite automatizar procesos). Y esto es solo una parte en el dominio de la biología. La biología sintética, que combina varias disciplinas, entre las que se encuentran la ciencia computacional, la ingeniería electrónica y la biofísica, permite generar componentes y sistemas biológicos novedosos. Los campos de aplicación incluyen la agricultura, la farmacéutica, el desarrollo de nuevos materiales y la salud.

Por último, miremos el campo de la manufactura. La forma en la que hacemos las cosas está viviendo una transformación, tal vez por primera vez en cientos de miles de años. Generalmente en la producción usamos un proceso sustractivo. De manera más sencilla o más sofisticada, usamos un “cincel” y un “martillo” para eliminar las partes que no necesitamos con el fin de obtener el producto deseado; también es usual el método de fundir en un molde. Pero en estos métodos solo podemos reproducir un mismo producto, de modo que si queremos uno nuevo debemos hacer otro molde. Por eso resulta revolucionaria la aparición de la manufactura aditiva o la impresión 3D, una tecnología exponencial que combina CAD, robótica y nuevos materiales, entre otras técnicas, y que no depende de un molde específico para la producción.

De manera que un reto actual para la Facultad de Ingeniería y Ciencias Básicas es entender cómo se pueden combinar estos dominios tecnológicos (computación, energía, biología y manufactura) y proponer nuevas interacciones en la generación de soluciones a los problemas de nuestra sociedad. Esperamos que la presente publicación contribuya al cumplimiento de este desafío contemporáneo.

ADOLFO JOSÉ NARANJO PARRA

DECANO

FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS BÁSICAS

# Modelación en sistemas dinámicos del cambio del uso del suelo por cultivos de palma de aceite para producción de biodiésel en Colombia

Dynamic systems modeling of land use change by oil palm cultivation for biodiesel production in Colombia

Karen Solangie Torres Bernate\*, Laura Stephania Calderón Ruiz\*\* y Sandra Cecilia Bautista Rodríguez\*\*\*

---

## Cómo citar:

Torres Bernate, K. S., Calderón Ruiz, L. S., & Bautista Rodríguez, S. C. (2020). Modelación en sistemas dinámicos del cambio del uso del suelo por cultivos de palma de aceite para producción de biodiésel en Colombia. *Ingeciencia*, 5, 7-23.

\* Estudiante de octavo semestre de Ingeniería Ambiental, Universidad Central. Forma parte del semillero Econciencia. Correo: ktorresb1@ucentral.edu.co

\*\* Estudiante de octavo semestre de Ingeniería Ambiental, Universidad Central. Forma parte del semillero Econciencia. Correo: lcalderonr@ucentral.edu.co

\*\*\* Doctora en Ingeniería Química, doctora en Ingeniería de Sistemas Industriales, magíster en Medio Ambiente y Desarrollo e ingeniera química de la Universidad Nacional de Colombia. Docente investigadora de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Básicas de la Universidad Central. Correo: sbautistar2@ucentral.edu.co

## Resumen

La creciente demanda de la producción de aceite de palma ha implicado un cambio directo e indirecto en el uso del suelo, lo cual influye en el balance de la captura de carbono, principalmente por el cambio de bosques a tierras con cultivos de palma. Dado que Colombia es el primer productor de aceite de palma en América Latina y el quinto en el mundo, es necesario analizar la sostenibilidad de la producción en la etapa del cultivo. Para ello, se realizó una modelación en dinámica de sistemas con datos históricos entre 2012 y 2018. Se concluye que es necesario aumentar el rendimiento en la producción del aceite de palma y que el principal tipo de cambio de uso de suelo debe ser de tierras degradadas a tierras de palma, en lugar de aquellas que involucren tierras ganaderas. Además, el Gobierno debe incrementar la reforestación anual mínimo en 60%. Implementar estas alternativas no afecta la economía del sector palmero, de manera que es una alternativa sostenible que no genera pérdidas para la industria.

**Palabras clave:** bioenergía, biocombustible, cambio directo del suelo (LUC), deforestación, sostenibilidad.

---

## Abstract

Increased demand for palm oil production has led to direct and indirect change in land use by influencing the balance of carbon capture mainly by switching from forests to land with palm crops. Because Colombia is the first palm oil producer in Latin America and the fifth in the world, it is necessary to analyze the sustainability of production at the growing stage. To this end, a dynamic modeling of systems with historical data was carried out between 2012-2018, thus concluded that palm oil yield should be increased, and the main rate of land use change should be from degraded land to palm land, not those involving livestock land. In addition, the government must increase the amount of land reforested annually by at least 60%. Implementing such alternatives does not affect the economy of the palm sector, being a sustainable alternative without generating losses for the industry.

**Keywords:** bioenergy, biofuel, deforestation, LUC, sustainability.

## 1. Introducción

A causa de la crisis energética mundial y de la escasez de los combustibles fósiles convencionales, se ha incentivado la fabricación de combustibles generadores de un menor impacto ambiental, como el biodiésel fabricado a partir de palma de aceite, cuyo cultivo ofrece beneficios económicos y, dependiendo del cambio del uso del suelo, aumenta la biodiversidad y mejora la calidad edáfica (Nahumb & Basto, 2018; Siregar *et al.*, 2019; Yui & Yeh, 2013). Gracias a estos beneficios, se han incrementado las hectáreas cultivadas con palma de aceite en los últimos años. Según cifras reportadas por Coral *et al.* (2019), en el 2018 el mayor productor de aceite de palma era Indonesia, con 41,5 millones de toneladas, seguido de Malasia, con 20,5 millones de toneladas, Tailandia, con 2,9 millones de toneladas, y Colombia, con 1,53 millones de toneladas.

No obstante, en Colombia este aumento ha traído consigo varios impactos ambientales, siendo uno de los más estudiados el desbalance en la captura de carbono asociado al *stock* del suelo. Este depende principalmente del tipo de cambio en el uso de la tierra, sobre todo aquel que involucra bosques y selvas, lo cual contribuye a que se incremente el efecto invernadero antropogénico (Henson *et al.*, 2012; Julio, 2017; Rojas & Castiblanco, 2018; Valencia-Botero *et al.*, 2014). Por lo tanto, esta investigación tiene como fin estudiar los posibles escenarios de la influencia del cambio en el uso del suelo asociado a la producción de biodiésel sobre la captura de carbono en Colombia con base en la modelación dinámica de sistemas. Para cumplir con este objetivo, se realizó una búsqueda sistemática de la literatura en la base de datos Scopus. A partir de allí, se realizó la estructuración del ciclo causal y del diseño de niveles y flujos en el software Vensim, con el fin de analizar la validación del modelo mediante la prueba MAPE y la sensibilidad a los cambios para construir escenarios de sostenibilidad.

## 2. Métodos

Se realizó una revisión sistemática de literatura por medio de reportes de investigación entre los años 2007–2020 en la base de datos Scopus. Posteriormente, se aplicó dinámica de sistemas para identificar el comportamiento temporal de la producción de aceite de palma en la etapa del cultivo para analizar la sostenibilidad a partir de la identificación del problema y las variables relacionadas, la definición de las relaciones causales, la construcción del modelo de niveles y flujos, y la simulación y validación del modelo.

## 3. Resultados y discusión

### 3.1 Descripción del problema

Debido al aumento de la población y de la demanda energética, se ha incrementado la cantidad de tierras para cultivos de palma de aceite (Bruinsma, 2009; Henson *et al.*, 2012; Rojas & Castiblanco, 2018). La promoción de estos monocultivos ha generado un reemplazo de tierras agrícolas y ganaderas, mediante la implementación de prácticas que empobrecen el suelo (Valencia-Botero *et al.*, 2014; Julio, 2017), lo cual ha ocasionado un

crecimiento tardío de cultivos de palma y una disminución del rendimiento en la producción del aceite de palma (Bruinsma, 2009; Rojas & Castiblanco, 2018).

Este cambio en el uso del suelo incentiva además la deforestación de bosques y selvas (Bruinsma, 2009; Henson *et al.*, 2012; Julio, 2017; Rojas & Castiblanco, 2018; Valencia-Botero *et al.*, 2014), lo cual genera un desbalance en la captura de carbono, que según Hanaki y Portugal (2018) y Brinkmann Consultancy (2009) proviene de la conversión de tierras forestales a cultivos energéticos. Este fenómeno contribuye al efecto invernadero antropogénico y al calentamiento global porque impide el proceso fotosintético y como consecuencia se genera una acumulación de CO<sub>2</sub> en la atmósfera (Valencia-Botero *et al.*, 2014).

No obstante, según Siregar *et al.* (2018), algunos cambios directos del suelo (LUC) están relacionados con el incremento económico de los palmicultores en países en desarrollo, debido a que contribuyen a la creación de empleo y al crecimiento económico de la región. Sin embargo, dado que, a mayor crecimiento económico, menor cantidad de bosques, es necesario analizar escenarios de sostenibilidad mediante iniciativas de deforestación cero en Colombia (Ideam & Minambiente, 2017).

### 3.2 Definición de las variables del modelo

Las variables identificadas para establecer las relaciones de causalidad se asocian por medio de 11 niveles, 23 flujos y 47 variables auxiliares. Dichas relaciones de proporcionalidad directa se presentan como bucles de retroalimentación positiva (R), es decir, que refuerzan el cambio original, y bucles balanceados (B) en caso de que el efecto de retroalimentación se oponga al cambio original y permita un equilibrio.

Los datos históricos entre 2012-2018 se tomaron de fuentes oficiales del DANE, Fedebiocombustibles, Fedepalma y artículos de revisión. Se tuvieron en cuenta aspectos sociales, económicos y ambientales con el fin de evaluar la sostenibilidad de la producción de aceite de palma (AP) para la generación de biodiésel en la etapa del cultivo. Las coberturas estudiadas corresponden a tierras degradadas (TD), tierras ganaderas (TG), tierras agrícolas estacionarias (TAE), tierras agrícolas perennes (TAP), tierras de bosque (TB) y tierras con palma de aceite (TP); además, otras variables importantes son el cambio directo del suelo (LUC) y el cambio indirecto del suelo (ILUC).

### 3.3 Definición de los diagramas de ciclos causales

La producción de biodiésel influye en la demanda de aceite de palma, por lo cual, cuando aumenta la población (Yu *et al.*, 2011) y la producción de biodiésel tiene un alza, la demanda de aceite de palma crecerá, y esta a su vez influirá directamente en el incremento de las tierras de cultivo con palma de aceite (figura 1).



### 3.4 Definición del modelo formal en dinámica de sistemas

El modelo de niveles y flujos se compone de cuatro submodelos: el *primer submodelo* corresponde a aspectos sociales. Este, a su vez, se conecta con el *segundo submodelo*, que se refiere a aspectos económicos y que relaciona la cantidad de AP y el crecimiento económico del sector palmero, el cual es influido por los créditos financieros, el peso del sector palmero al PIB agropecuario, las ventas de biodiésel y de AP, la exportación de AP, los ingresos mínimos medios de los palmicultores y el PIB per cápita. Mediante el flujo de los cultivos de TP, este submodelo se conecta con el *tercer submodelo*, relacionado con los LUC e ILUC estudiados, los cuales soportan las respectivas tasas de conversión. Específicamente, en las tasas de conversión se resalta la importancia de la diferencia entre el LUC, ILUC y la influencia del factor externo en la meta de máxima deforestación. Este, a su vez, se conecta con el *cuarto submodelo*, que se refiere al balance de la captura de carbono mediante los factores de captura por cada LUC e ILUC relacionados antes, durante y después de las transformaciones en relación (figura 2).

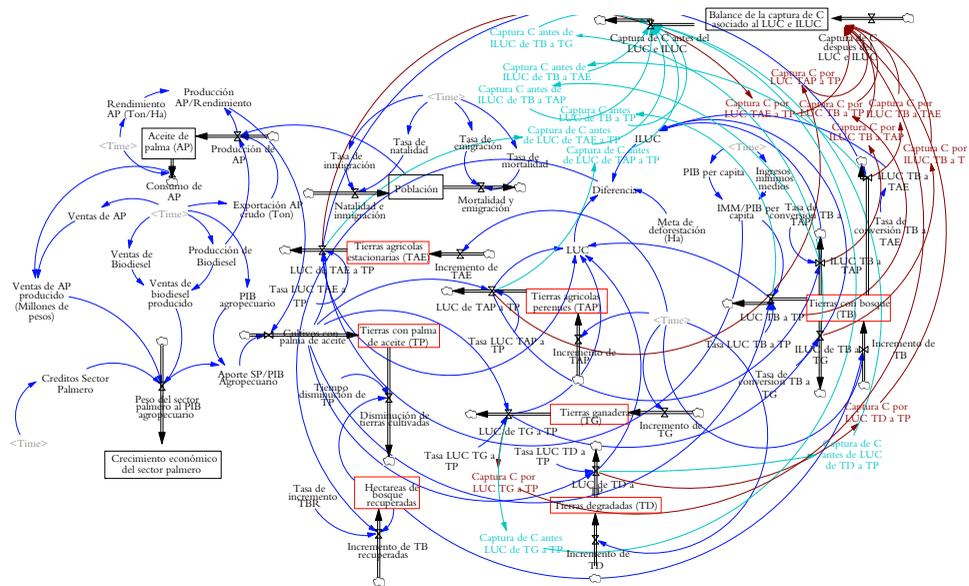


Figura 2. Simulación de niveles y flujos.  
Fuente: elaboración propia.

### 3.5 Validación del modelo

Se visualizó que la mayoría de MAPE están por debajo del 30%, por lo tanto, según Bautista *et al.*, (2019), Siregar *et al.* (2018) y Kim y Kim (2016), las relaciones causales y las ecuaciones cumplen con las condiciones de validación, y, por lo tanto, el modelo representa adecuadamente el comportamiento del sistema (tabla 1).

Tabla 1. Validación dinámica del modelo mediante MAPE

Indicadores principales	MAPE (2011-2018)
Consumo de AP	2,40 %
Producción de AP	5,52 %
Producción de Biodiésel	2,02 %
Exportación de AP (t)	13,36 %
Créditos sector palmero	11,55 %
Ventas de biodiésel	8,18 %
Ventas de AP producido (millones de pesos)	3,48 %
Peso del sector palmero al PIB agropecuario	13,69 %
PIB agropecuario	12,51 %
Rendimiento AP (t/ha)	5,69 %
Cultivos con palma de aceite	4,27 %

Fuente: elaboración propia.

### 3.6 Definición de escenarios de análisis del modelo

#### 3.6.1 Escenario línea base

Para la línea base se considera que las condiciones, tendencias y funciones encontradas entre 2012 y 2018 seguirán el mismo comportamiento durante el período de análisis (2018-2025). La simulación se realiza desde el año 2011 (tiempo 0) hasta el 2025 (tiempo 14) en años.

#### 3.6.2 Escenario en condiciones sostenibles

El escenario sostenible se construye teniendo en cuenta los valores de las variables exógenas que no representen una amenaza a las hectáreas de bosque natural, tierras agrícolas e ingresos monetarios del sector palmero (tabla 2).

Tabla 2. Escenario base vs. escenario sostenible

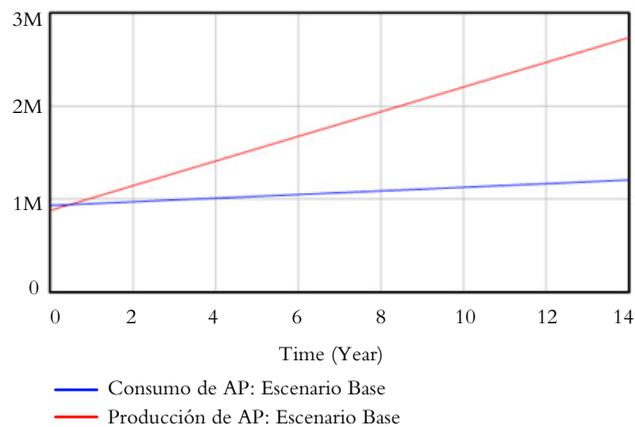
Variable exógena crítica	Valor en línea base	Valor en escenario sostenible
Tasa LUC TAE a TP	23,7 %	20,73 %
Tasa LUC TG a TP	45,9 %	22,95 %
Tasa LUC TB a TP	5,9 %	0 %
Tasa LUC TD a TP	3,6 %	35 %
Rendimiento AP (t/ha)	3,07 - 4,04 t/ha	3,07 - 8,08 t/ha
PIB agropecuario	4e+10 - 1,1e+11 (millones de pesos colombianos)	4e+10 - 2,2e+11 (millones de pesos colombianos)
Tasa de incremento TBR	Aumento del 20 % de las tierras recuperadas de bosque anualmente.	Crecimiento del 80 % de las tierras recuperadas de bosque anualmente.

Fuente: elaboración propia.

### 3.7 Simulación del modelo y análisis de resultados

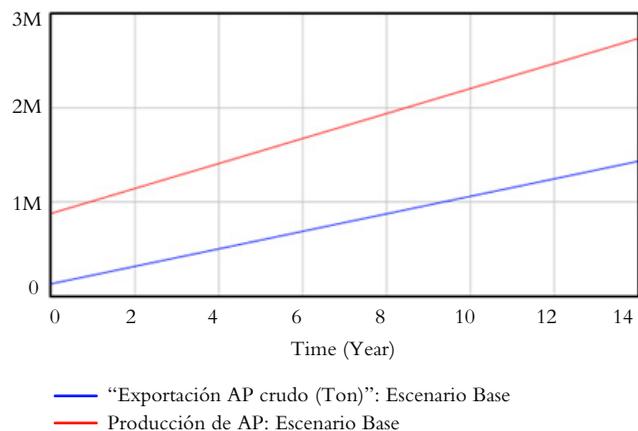
#### 3.7.1 Simulación del escenario línea base

El comportamiento del AP se muestra en las figuras 3 y 4. Allí se evidencia que la producción es mayor al consumo, ya que el peso de la población colombiana en la ecuación que determina el crecimiento de la producción de AP es muy bajo. La exportación de AP establece el comportamiento y la cantidad de AP que se fabrica en el país (figura 4), de manera que determina la tendencia de la producción de AP. En consecuencia, el consumo per cápita del AP puede ser bajo, pero su exportación es bastante grande.



**Figura 3.** Modelación de aceite de palma en Colombia: consumo vs. producción (en megatoneladas).

**Fuente:** elaboración propia.

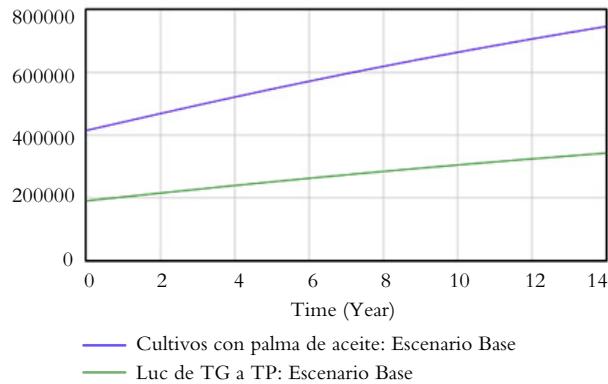


**Figura 4.** Modelación de aceite de palma en Colombia: exportación vs. producción (en megatoneladas).

**Fuente:** elaboración propia.

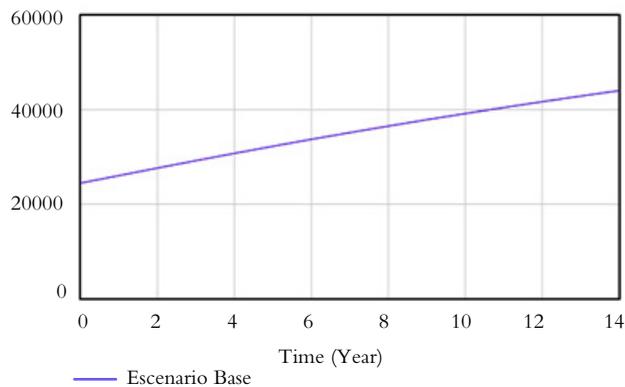
A partir de la simulación se pudo ver que las TP se incrementarán conforme avanza el tiempo, iniciando con 415 250 ha hasta llegar a 747 243 ha (figura 5). Por otro lado, se evidencia que el mayor LUC es aquel que involucra TG. Al respecto, según Castiblanco *et al.* (2013) y Ramírez-Contreras *et al.* (2020), la tasa de conversión de TG en Colombia

equivale al 45,9% de las TP en el país —siendo el LUC más representativo—, comenzando en 190600 ha y finalizando con 342985 ha. También se encontró que el LUC que involucra bosque natural representa el 5,9% de las TP: inició con 24499 ha y terminó con 44087 ha (figura 6).



**Figura 5.** Modelación de los LUC por tipo de cobertura: cultivos con palma de aceite vs. LUC de TG a TP (en hectáreas).

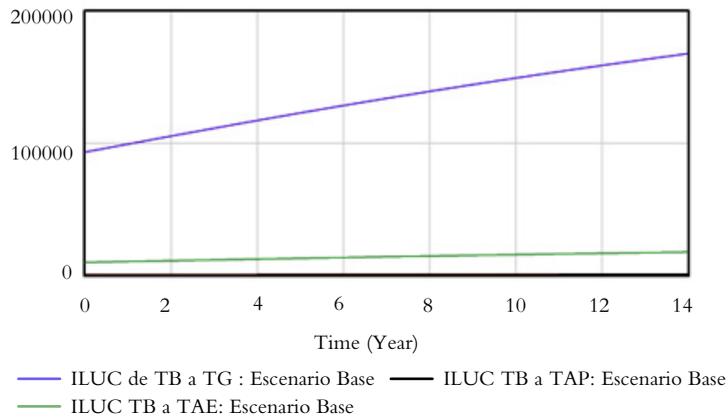
**Fuente:** elaboración propia.



**Figura 6.** Modelación de los LUC por tipo de cobertura: LUC TB a TP (en hectáreas).

**Fuente:** elaboración propia.

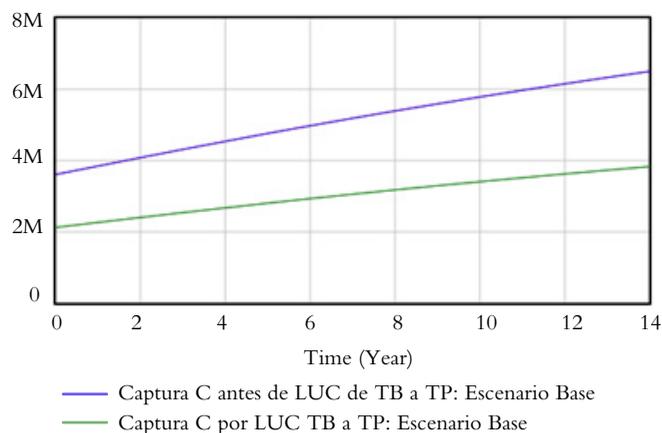
Para modelar el ILUC, se tuvo en cuenta la información suministrada por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, por su sigla en inglés). De acuerdo con esta institución, en los últimos seis años la deforestación por ganadería en el Amazonas fue del 49% y del 20% en tierras agrícolas. Teniendo en cuenta lo anterior, se asumió que el ILUC de TG, TAE y TAP a tierras de bosque (TB) sería igual al LUC multiplicado por las tasas mencionadas, con la única variación de que para las tierras agrícolas perennes y estacionarias, la tasa reportada por la FAO estaría repartida en 10% para TAP y 10% para TAE. De esta forma, se evidenció que el ILUC de TB a TG es el más grande, pues alcanzó las 168063 ha en el último año modelado (figura 7).



**Figura 7.** Modelación de los ILUC producto del LUC a TP (en hectáreas).

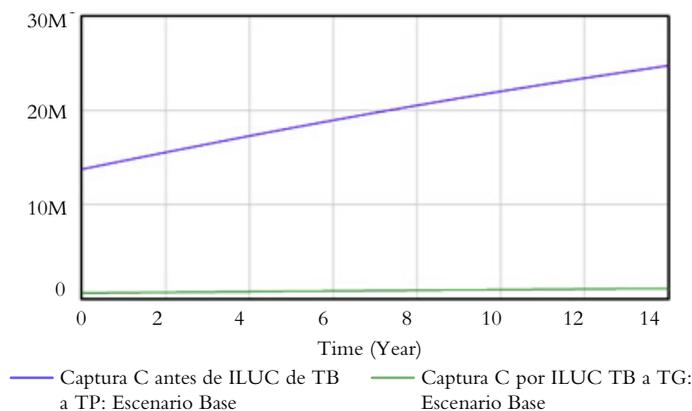
**Fuente:** elaboración propia.

Aunque la captura de carbono por hectárea (tC/ha) que incluye todos los LUC es positiva, al observar aquellos LUC e ILUC que involucran TB (figuras 8-11), se cuantifica que, al cambiar de TB a TP, el suelo pasa de capturar 6,50 millones de tC/ha a 3,83 millones de tC/ha. De manera similar ocurre cuando se da un ILUC de TB a TP producto de la conversión del 49% de TG que pasaron a ser TP, ya que estas capturaban 24,7 millones de tC/ha y, según el modelo, capturarán solo 1,05 millones de tC/ha. Asimismo, al tener un ILUC de TB a TAE, en el que solo se tiene en cuenta el 10% del Luc a TP, estas tierras pasan de capturar 2,61 millones de tC/ha a 74 380 tC/ha, y cuando se involucra un ILUC de TB a TAP, en el que este representa solo el 10% del LUC TAP a TP, la tierra pasa de capturar 154 306 tC/ha a 30 233 tC/ha.



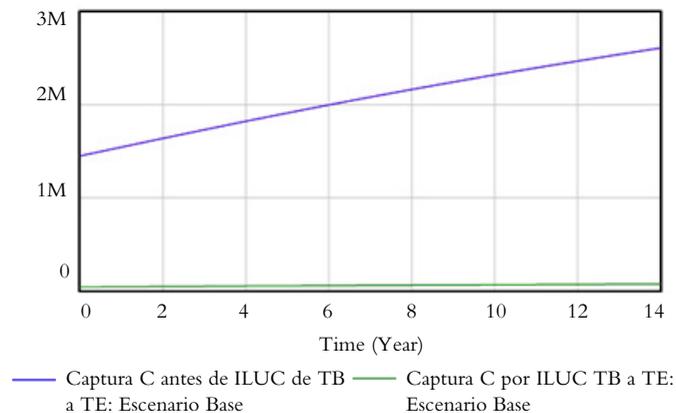
**Figura 8.** Modelación de la captura de C antes y como consecuencia de LUC de TB a TP (en millones de tC/ha).

**Fuente:** elaboración propia.



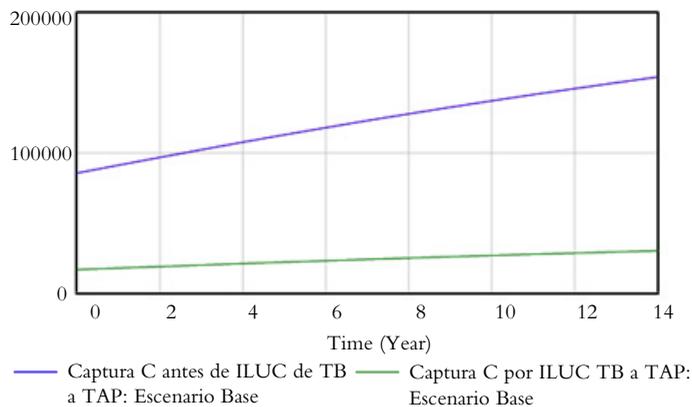
**Figura 9.** Modelación de la captura de C antes y como consecuencia de ILUC de TB a TG (en millones de tC/ha).

**Fuente:** elaboración propia.



**Figura 10.** Modelación de la captura de C antes y como consecuencia de ILUC de TB a TAE (en millones de tC/ha).

**Fuente:** elaboración propia.

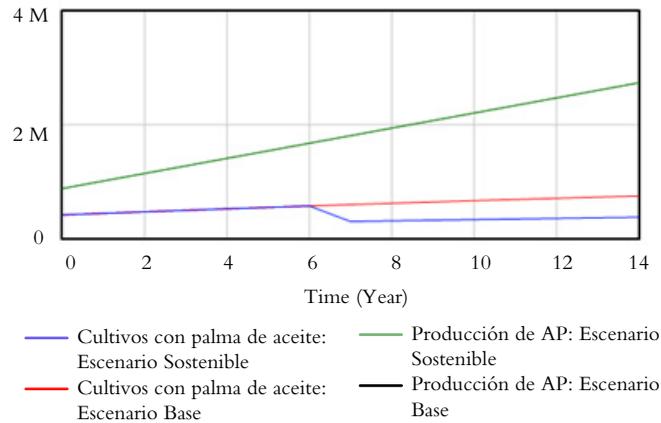


**Figura 11.** Modelación de la captura de C antes y como consecuencia de ILUC de TB a TAP (en millones de tC/ha).

**Fuente:** elaboración propia.

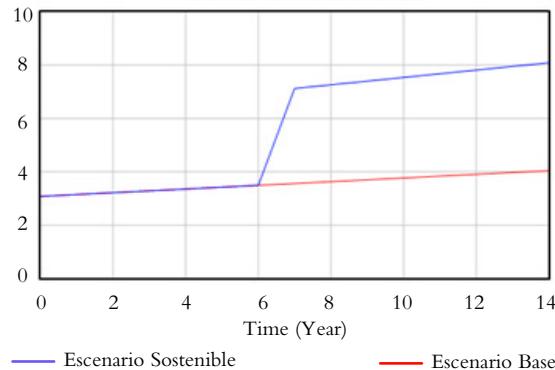
### 3.7.2 Simulación del escenario en condiciones sostenibles

Con esta simulación, la cantidad de ha necesarias para obtener las mismas toneladas de AP producidos en el escenario base disminuye a 373 622 ha (figura 12), debido al aumento del rendimiento del AP, el cual pasa de ser 3,49 t/ha a 8,08 t/ha (figura 13), de manera que, a mayor rendimiento del AP, menor cantidad de cultivos con palma de aceite.



**Figura 12.** Modelación del escenario sostenible para las TP y producción de AP (en millones de hectáreas).

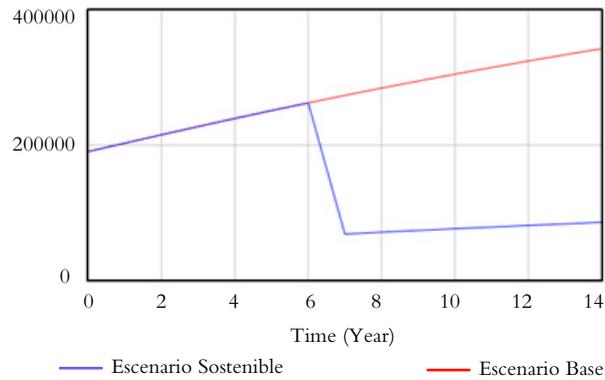
**Fuente:** elaboración propia.



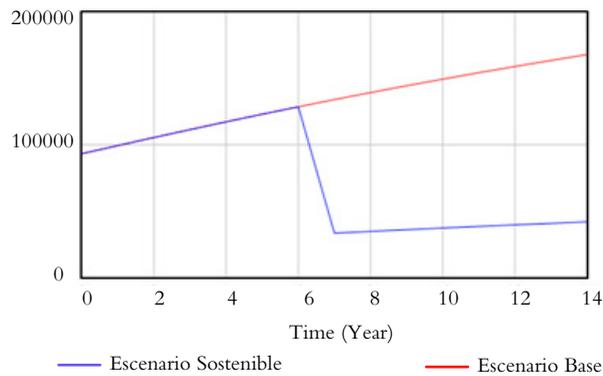
**Figura 13.** Comparación del rendimiento de AP entre el escenario base y el escenario sostenible (en toneladas por hectárea).

**Fuente:** elaboración propia.

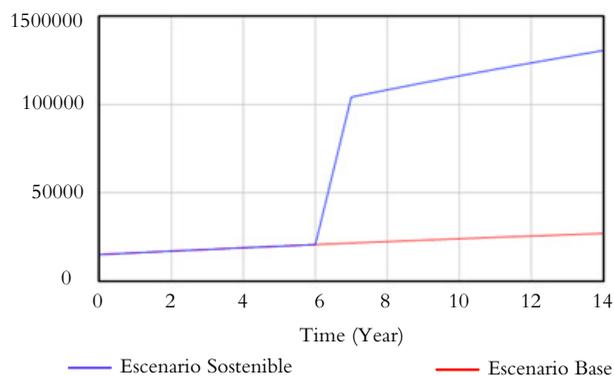
Al disminuir la cantidad de ha con PA, los LUC se reducen. Debido a esto, se puede evidenciar que el mayor LUC disminuyó, ya que las TG a TP pasarían de ser 342 985 ha a 85 746 ha, y las TB a TP pasarían de ser 44 087 ha a 0 ha (figuras 14 y 17). No obstante, el escenario sostenible se planteó de tal manera que las tierras que dejaron de pasar a ser palma fueran reemplazadas por TD, por tal motivo el LUC de TD a TP pasa de ser 26 900 ha a 130 768 ha (figura 16). De este modo, al disminuir la cantidad de ha que pasan a palma provenientes de usos del suelo como TAE, TAP y TG, la cantidad de TB deforestadas por los ILUC disminuyen con respecto a las deforestadas en el escenario base, tal como se evidencia en la figura 15, donde el ILUC de TB a TG pasa de ser 168 063 ha a 42 016 ha.



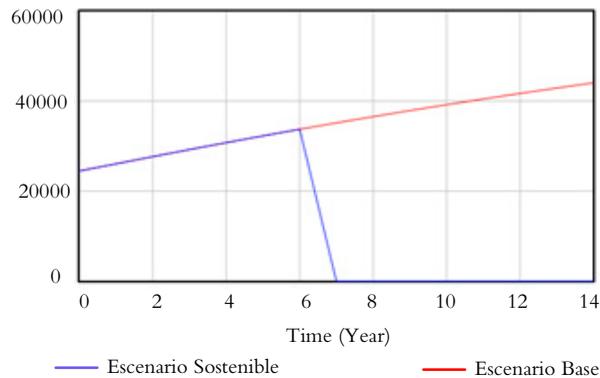
**Figura 14.** Modelación del escenario base vs. escenario sostenible para los LUC de TG a TP (en hectáreas).  
Fuente: elaboración propia.



**Figura 15.** Modelación del escenario base vs. escenario sostenible para los ILUC de TB a TG (en hectáreas).  
Fuente: elaboración propia.



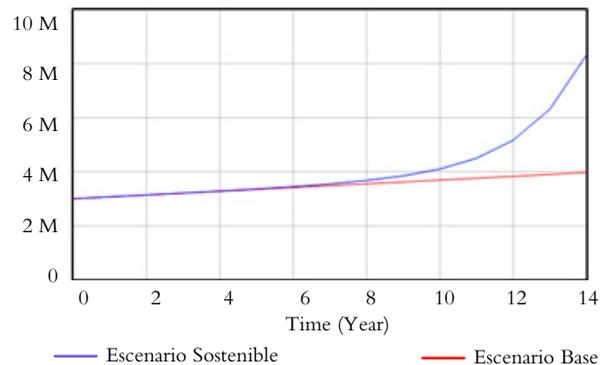
**Figura 16.** Modelación del escenario base vs. escenario sostenible para los LUC de TD a TP (en hectáreas).  
Fuente: elaboración propia.



**Figura 17.** Modelación del escenario base vs. escenario sostenible para los LUC de TB a TP (en hectáreas).

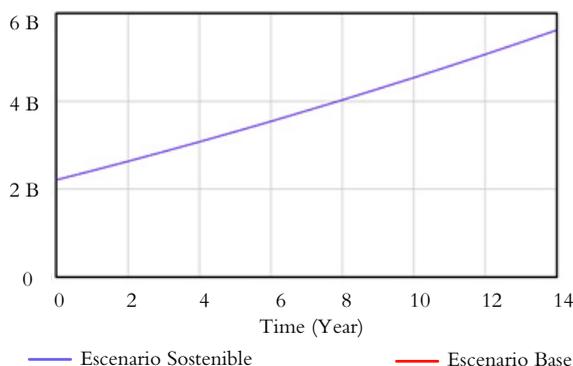
**Fuente:** elaboración propia.

Al disminuir la cantidad de TP con respecto al escenario base, la captura de C disminuye, ya que esta pasa de  $5,35e+07$  tC/ha a  $2,63e+07$  tC/ha para el año 2025. No obstante, al implementarse las condiciones del escenario sostenible, el 50% de la captura total después de presentarse los LUC e ILUC a TP proviene de TD, mientras que en el escenario base la captura por este LUC representaba solo el 4% del total, y la captura se daba principalmente de los cambios de uso del suelo que involucraban tierras agrícolas y ganaderas, que a su vez generaban un efecto negativo sobre las TB. De esta forma, las hectáreas de bosque pasarían de ser  $3,97e+06$  ha con las condiciones del escenario base, a  $8,33e+06$  ha de bosque para el 2025 (figura 18), sin afectar el crecimiento económico del sector palmero (figura 19), todo esto mediante la reducción de las tasas que involucran LUC provenientes de tierras agrícolas o ganaderas, pero aumentando el cambio en el uso del suelo de TD a TP e incrementando la tasa de TB recuperadas anualmente en el 80%.



**Figuras 18.** Modelación del escenario base vs el escenario sostenible para el incremento de TB (en millones de pesos).

**Fuente:** elaboración propia.



**Figura 19.** Modelación del escenario base vs el escenario sostenible para el peso del sector palmero al PIB agropecuario (en millones de pesos).

**Fuente:** elaboración propia.

## 4. Conclusión

La modelación del escenario sostenible muestra que a medida que aumenta el rendimiento del aceite de palma, la cantidad de hectáreas necesarias para su producción disminuye. Al reducir las hectáreas con PA, decrecen los LUC que involucran tierras agrícolas y ganaderas, así como los efectos que tenían sobre las tierras de bosque. Se concluye que es posible continuar produciendo aceite de palma al ritmo actual sin generar consecuencias negativas sobre las TB; no obstante, es necesario incrementar el rendimiento del AP y debe existir un compromiso del sector palmero, ya que el principal tipo de LUC debe ser de TD a TP, y no aquellos que involucren tierras ganaderas.

Asimismo, el gobierno debe elevar la cantidad de tierras reforestadas anualmente mínimo en 60% ya que, de no ser así, se anularía totalmente el beneficio sobre las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) al usar biocombustibles a partir de AP. Además, se evidenció que implementar este tipo de alternativas no afecta el crecimiento económico del sector palmero, por lo cual se convierte en una alternativa sostenible que no generan pérdidas para la industria. Por último, se recalca la necesidad de desarrollar estudios que cuantifiquen la influencia del ILUC sobre las TB, ya que hay un vacío de conocimiento porque tales estudios no existen en Colombia.

## Agradecimientos

Agradecemos a Dios por permitirnos realizar esta investigación, a nuestras familias y a la profesora Sandra Cecilia Bautista por su acompañamiento y dirección en la ejecución de este trabajo.

## Referencias

- Bautista, S., Espinoza, A., Narváez, P., Camargo, M., & Morel, L. (2019). A system dynamics approach for sustainability assessment of biodiesel production in Colombia: Baseline simulation. *Journal of Cleaner Production*, 213, 1–20. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.111>
- Brinkmann Consultancy. (2009). *Greenhouse Gas Emissions from Palm Oil Production: Literature review and proposals from the RSPO Working Group on Greenhouse Gases* [Final Report]. <https://bit.ly/2k9oATa>
- Bruinsma, B. (2009). *Producción de biodiésel de palma aceitera y jatropha en la Amazona del Perú y el impacto para la sostenibilidad: Un análisis sostenible del ciclo de vida*. Agriterra y Conveagro. <https://bit.ly/3AArQMr>
- Castiblanco, C., Etter, A., & Aide, T. M. (2013). Oil palm plantations in Colombia: A model of future expansion. *Environmental Science & Policy*, 27, 172–183. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2013.01.003>
- Coral Medina, J. D., Magalhães Júnior, A. I., Zamora, H. D., & Quijano Melo, J. D. (2019). Oil palm cultivation and production in South America: status and perspectives. On the Map: Oil Palm in South America. *Biofuels, Bioprod & Bioref*, 13(5), 1202–1210. <https://doi.org/10.1002/bbb.2013>
- Hanaki, K., & Portugal-Pereira J. (2018). The effect of biofuel production on greenhouse gas emission reductions. En K. Takeuchi, H. Shiroyama, O. Saito & M. Matsuura (Eds.), *Biofuels and Sustainability: Science for Sustainable Societies* (pp 53–71). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-4-431-54895-9\\_6](https://doi.org/10.1007/978-4-431-54895-9_6)
- Henson, I. E., Ruiz Romero, R., & Romero, H. M. (2012). The greenhouse gas balance of the oil palm industry in Colombia: A preliminary analysis: II. Greenhouse gas emissions and the carbon budget. *Agronomía Colombiana*, 30(3), 370–378. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/agrocol/article/view/28615>
- Ideam, & Minambiente. (2017). *Bosques Territorios de Vida: Estrategia integral de control a la deforestación y gestión de los bosques*. [https://redd.unfccc.int/files/eic-dgb\\_bosques\\_territorios\\_de\\_vida\\_web.pdf](https://redd.unfccc.int/files/eic-dgb_bosques_territorios_de_vida_web.pdf)
- Julio Meza, L. F. (2017). Análisis prospectivo de la cadena productiva de palma africana para obtención de biodiesel en Colombia [Tesis, Universidad de San Buenaventura]. Repositorio USB. <https://bit.ly/3Aivf1Y>
- Kim, S., & Kim, H. (2016). A new metric of absolute percentage error for intermittent demand forecasts. *International Journal of Forecasting*, 32(3), 669–679. <https://doi.org/10.1016/j.ijforecast.2015.12.003>
- Nahum, J. S., & Bastos dos Santos, C. (2018). Agricultura familiar e dendeicultura no município de Moju, na Amazônia paraense. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*, 27(1), 50–66. <https://doi.org/10.15446/rcdg.v27n1.58081>
- Ramirez-Contreras, N. E., Munar-Florez, D. A., Garcia-Nuñez, J. A., Mosquera-Montoya, M., & Faaij, A. P. C. (2020). The GHG emissions and economic performance of the Colombian palm oil sector; current status and long-term

- perspectives. *Journal of Cleaner Production*, 258, Article 120757. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120757>
- Rojas, J. C., & Castiblanco Rozo, C. (2018). Variabilidad espacial y análisis multitemporal sobre los cambios en las coberturas de la tierra ocasionados por la expansión del cultivo de la palma de aceite en los años 1985, 2000 y 2016 en el municipio de San Carlos de Guaroa (Colombia). *Gestión y Ambiente*, 21(1), 59-68. <https://doi.org/10.15446/ga.v21n1.69096>
- Siregar, K., Tambunan, A., Sholihati, S., Wirawan, S., & Araki, T. (2019). Comparison of energy production, net energy balance, net energy ratio, and renewable index for biodiesel production from oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) and jatropha (*Jatropha curcas* L.) based on life cycle assessment. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, 293, Article 01025. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/293/1/01025>
- Siregar, P. G., Supriatna, J., Koestoer, R. H., & Harmantyo, D. (2018). System dynamics modeling of land use change in West Kalimantan, Indonesia. *Biotropia*, 25(2), 103-111. <https://doi.org/10.11598/btb.2018.25.2.792>
- Valencia-Botero, M. J., Rincón-Pérez, L. E., & Cardona-Alzate, C. A. (2014). Effect of change in land use due to oil palm cultivation for biodiesel production in Colombia. *Ingeniería y Universidad*, 18(1), 91-102. <https://doi.org/10.11144/Javeriana.IYU18-1.ecut>
- Yu, W., Zang, S., Wu, C., Liu, W., & Na, X. (2011). Analyzing and modeling land use land cover change (LUCC) in the Daqing City, China. *Applied Geography*, 31(2), 600-608. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2010.11.019>
- Yui, S., & Yeh, S. (2013). Land use change emissions from oil palm expansion in Pará, Brazil depend on proper policy enforcement on deforested lands. *Environmental Research Letters*, 8(4), Article 044031. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/8/4/044031>

# Aplicación de GIS y AHP en la delimitación de zonas de recarga de acuíferos en áreas semiáridas en el departamento del Cesar

Application of GIS and AHP in the delimitation of aquifer recharge zones in semi-arid areas in the department of Cesar

Andrés Felipe Arias Pérez \*

---

---

## Cómo citar:

Arias Pérez, A. F. (2020). Aplicación de GIS y AHP en la delimitación de zonas de recarga de acuíferos en áreas semiáridas en el departamento del Cesar. *Ingeciencia*, 5, 24-42.

---

\* Ingeniero ambiental, Universidad Central. Correo: aarias4@ucentral.edu.co

## Resumen

El abastecimiento de agua en el centro del departamento del Cesar es cada vez más crítico porque el 60,69% proviene de aguas subterráneas. No obstante, la información hidrogeológica de la región está desactualizada (se remonta a 1995 y 2006), por lo cual es pertinente hacer nuevos estudios con sensores remotos para identificar zonas de recarga directa. Con este objetivo, se combinaron distintas capas temáticas: geología, isoyetas NDMI, MNDWI, DEM y NDVI, junto con técnicas de análisis de procesos jerárquicos (AHP), para evaluar el potencial de recarga directa de los acuíferos en la zona. De acuerdo con el mapa resultante, el 49,1% del área corresponde a zonas de nulo, muy bajo y bajo potencial de recarga directa. Asimismo, existe una zona catalogada como aceptable, que representa el 44,85% total del área y que en temporada de excesos configura escenarios de recarga directa. Finalmente, solo el 3,55% del área es una zona de alto potencial de recarga directa.

**Palabras clave:** AHP, hidrología, humedad del suelo, Landsat, sensores remotos.

---

## Abstract

The water supply in the center of the department of Cesar is more critical year by year because 60.69% comes from groundwater. However, the hydrogeological information of the region is outdated, dating back to 1995 and 2006, which is why it is relevant to make new studies with remote sensors to identify direct recharge zones in the center of the department. With this objective, different thematic layers were combined: geology, NDMI isoyetas, MNDWI, DEM and NDVI, together with techniques of hierarchical process analysis (AHP), to evaluate the direct recharge potential of aquifers in the area. According to the resulting map, 49.1% of the area corresponds to zones of null, very low and low direct recharge potential. It is also identified that there is an area classified as acceptable, which represents 44.85% of the total area and, which in excess season sets up direct recharge scenarios. Finally, only 3.55% is an area of high direct recharge potential.

**Keywords:** AHP, hydrogeology, Landsat, remote sensing, soil moisture.

## 1. Introducción

El territorio de análisis comprende los municipios de Bosconia, El Paso, Astrea, Chiriguana, Chimichagua, Curumaní y La Jagua de Ibirico. Según el censo hecho por el Departamento Nacional de Estadística (DANE) en el 2018, la población de estos municipios es de 176 444 habitantes, de los cuales el 60,69% depende de la captación de agua subterránea. El total de reservas calculadas es de 218 346 000 m<sup>3</sup> y su explotación está por el orden de 39 331 050 m<sup>3</sup> anuales utilizados para uso público, doméstico y uso industrial ganadero (Corpocesar & Ingeominas, 1995).

El estudio de aguas subterráneas por medio de imágenes satelitales se ha constituido en una herramienta práctica y rápida de análisis de los territorios. Sus inicios datan de hace más de treinta años y, desde entonces, ha sido tomado como referencia en distintos campos. La mayor referencia se encuentra en Asia, seguido de África.

Estudiando la potencialidad de recarga en el noroeste de Bangladesh, Adham *et al.* (2010) realizaron una investigación usando sistemas de información geográfica (SIG) y técnicas de teledetección tomando imágenes Landsat 7 y SPOT. Con base en sus análisis concluyeron que solo el 15% de la zona de estudio tiene potencial de recarga moderada, y únicamente el 8,6% del agua precipitada total se infiltra y recarga acuíferos locales.

Por su parte, Elbeih (2015) elaboró un mapeo hidrológico del recurso de agua subterránea en el desierto occidental Oasis y en la Península del Sinaí, Egipto. En esta investigación, las imágenes satelitales de ASTER y ALOS fueron cruzadas con mapas topográficos y mapas base, para crear mapas temáticos por medio de SIG, con los cuales se obtuvo un mapa hidrogeológico de la zona.

En la cuenca de Kharga, Egipto, Parks *et al.* (2017) realizaron un análisis con múltiples imágenes satelitales (MODIS, OLI, RADARSAT, SRTM) y datos auxiliares para identificar sitios potencialmente accesibles de aguas subterráneas. Con la litología y la densidad de drenajes, los autores obtuvieron cuatro mapas: densidad de fractura, inercia térmica, conductividad hidráulica de formaciones y espesor de los acuíferos. El análisis de los mapas evidenció que la zona estudiada es adecuada para la extracción de aguas subterráneas, pero su capacidad se reducirá significativamente en los próximos cincuenta años.

Posteriormente, Fallatah *et al.* evaluaron la recarga de los acuíferos utilizando un sistema integrado geofísico, geoquímico y de teledetección. Con este propósito utilizaron un modelo continuo de lluvias Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) y un modelo de escorrentías Soil and Water Assessment Tool (SWAT). El resultado arrojó que los acuíferos más profundos están más agotados que los más superficiales, además de que la tasa anual de recarga es aproximadamente 5,21 km<sup>3</sup> según el modelo GRACE.

En el mismo año, Senthilkumar *et al.* (2019) identificaron zonas de recarga de aguas subterráneas utilizando técnicas de teledetección y SIG en el sistema acuífero Amaravathi, India. Consideraron ocho distintas capas temáticas: geología, geomorfología, pendiente, tipo de suelo, uso de suelo, nivel del agua, la profundidad de meteorización y drenaje, que integraron junto a imágenes satelitales ASTER. Sus resultados mostraron que alrededor del 45% de la zona de estudio son catalogadas como altas y muy altas estructuras de recarga, y el 40% de la zona se cataloga como moderada.

En el estudio realizado por Bhagyaraj *et al* (2019) se recolectaron imágenes satelitales de SRTM y Landsat, con capas temáticas como: geología, pendiente, geomorfología, uso del suelo, densidad de drenaje y densidad lineal. Se aplicó el método de distancia ponderada para integrar todas las capas y, finalmente, se clasificó como muy bueno (6,5%), bueno (22,1%), moderado (51,2%), bajo (18,4%) y muy bajo (1,8%) según el potencial de recarga.

Los procesos analíticos de jerarquía (AHP, *analytic hierarchy process*) son utilizados especialmente en la toma de decisiones para evitar la intuición (Borja *et al.*, 2019). El AHP es un método lógico y estructurado de trabajo que optimiza la toma de decisiones complejas cuando existen múltiples criterios o atributos, mediante la descomposición del problema en una estructura jerárquica, de tal manera que se puede identificar la influencia de los atributos individuales que son objeto de decisión (Hurtado & Bruno, 2005). En el estudio realizado por Arulbalaji *et al.* (2019) se presentó una combinación del SIG y AHP para delimitar las zonas potenciales de agua utilizando imágenes SRTM (30 m), y se aplicó el proceso AHP para identificar la superposición ideal de los campos: geología, pendiente, geomorfología, uso del suelo y densidad de drenaje. El trabajo evidenció que el método es útil para reducir las decisiones complejas a una serie de comparaciones necesarias para el desarrollo de la investigación.

En América Latina se encuentran pocos estudios al respecto. Villanueva *et al.* (2019) exploraron la disponibilidad del agua subterránea de Campo Mina, Nuevo León (México), utilizando imágenes SPOT y SIG. Por medio de un DEM y capas temáticas: topografía, geología, hidromorfología, geología estructural, disección del relieve, pendiente e hidrogeología del lugar, los investigadores crearon un modelo tridimensional de potencial de agua subterránea, compuesto por cinco unidades geomorfológicas que actúan como acuíferos no confinados y una zona de recarga artificial aún no explotada, que se clasifica con un mediano potencial.

En Colombia se registran pocos estudios hidrogeológicos utilizando sensores remotos. Para encontrar información hidrogeológica de la región de estudio, es necesario consultar la *Evaluación de aguas subterráneas en el departamento de Cesar* (Corpocesar & Ideam, 2006). Dada la poca información disponible, en este artículo se presenta un estudio para identificar zonas de recarga de acuíferos por medio de sensores remotos, que determinan variaciones de humedad en el suelo y así poder compararlas con la información geológica, hidrológica e hidrogeológica de la región. Con este objetivo, en este estudio las capas temáticas tienen un orden de importancia que fue analizado con la metodología AHP y posteriormente comparado mediante SIG. De esta manera se logró abordar el componente hidrogeológico de la región para determinar las zonas potenciales de recarga directa, en un posible marco de actuación.

## 2. Materiales y métodos

### 2.1 Delimitación de la zona de estudio

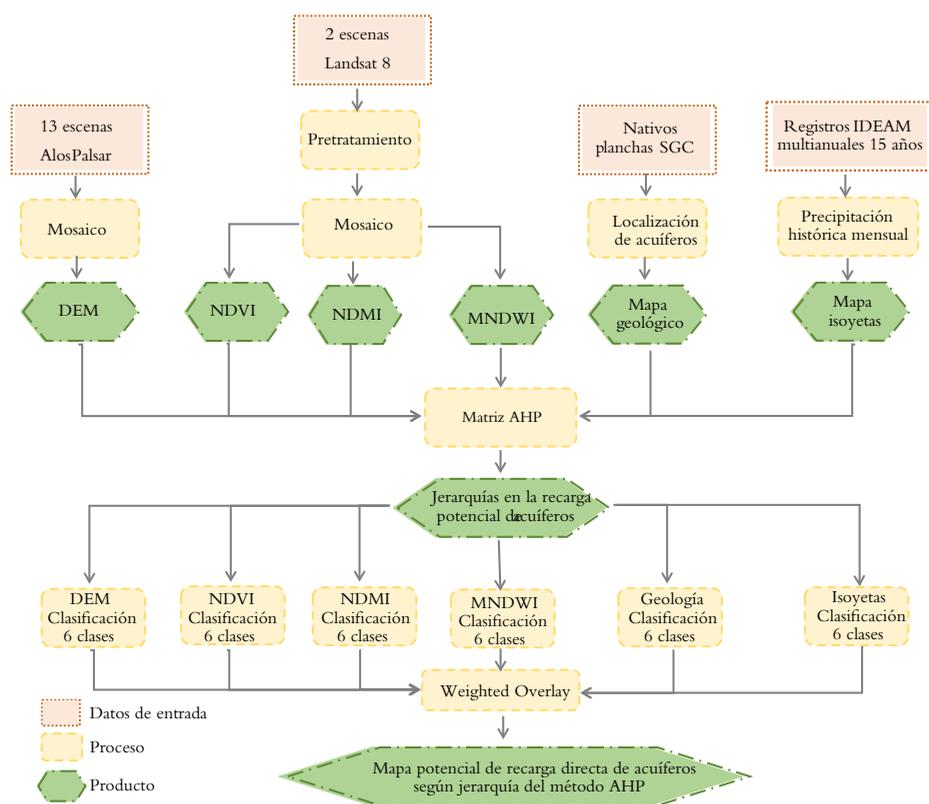
El área de estudio comprende los municipios de Bosconia, El Paso, Astrea, Chiriguaná, Chimichagua, Curumaní y La Jagua de Ibirico, que se encuentran ubicados en la zona centro del departamento del Cesar, de los cuales el 60,69% de sus habitantes depende de la captación de agua subterránea (figura 1). Los ecosistemas presentes en el área de estudio son: valle del río Cesar, serranía del Perijá y parte del complejo cenagoso de Zapatosa (Corpocesar & Ideam, 2011).



Figura 1. Mapa de la zona de estudio.  
Fuente: elaboración propia.

## 2.2 Metodología

La investigación tuvo dos fases para cumplir con los objetivos planteados (figura 2). En la *fase 1* se estudió el papel que tiene la humedad en la recarga directa de acuíferos y se relacionó con el marco geológico, hidrogeológico e hidrológico de la región de estudio. En la *fase 2* se reunieron las capas de información para realizar el proceso AHP elaborado por un experto. Finalmente, se hizo la normalización de las capas de información clasificándolas en seis clases según su incidencia en la recarga directa de acuíferos.



**Figura 2.** Descripción de las fases de la investigación.

**Fuente:** elaboración propia.

## 2.2.1 Fase 1

### 2.2.1.1 Relación humedad y teledetección

La teledetección ha sido utilizada en la investigación de aguas subterráneas desde hace treinta años, tiempo en el cual ha demostrado que es posible estimar la humedad superficial en el suelo. La técnica más usada es la teledetección por microondas, que se emplea con el fin de cartografiar el dominio de la humedad superficial en el espacio, que no es posible por otros medios (Jackson, 2002).

Con este método también se puede estudiar la humedad del subsuelo. Ahuja *et al.* (1993) describen una medida de referencia según la cual la humedad contenida en los primeros cinco centímetros de suelo puede ser escalada o nos brinda tanta información como un perfil de 0-30 centímetros. Luego de examinar la correlación entre la superficie y la humedad, los investigadores encontraron que la correlación disminuye a medida que se hace más profundo el perfil, sin embargo, aclaran que esto no significa que la humedad desaparezca.

Ahora bien, los mejores resultados tienen relación directa con la vegetación. Jackson (2002) ha demostrado que en suelos desnudos la humedad a veces es inexistente o no tiende a ser homogénea con la profundidad, en comparación con terrenos con índices de vegetación significativos.

### 2.2.1.2 Hidrogeología y geología general

La importancia de la clasificación hidrogeológica de las formaciones identificadas (tabla 1) radica en si presenta características como porosidad, conductividad hidráulica, extensión, espesor y composición granulométrica. La información de estas características se relaciona con circunstancias externas como: la explotación, la recarga y su relación con otros cuerpos de agua subterráneos o superficiales para obtener distintos potenciales, que se clasifican en grande, intermedia, pequeña, muy pequeña o sin importancia.

Tabla 1. Litoestratigrafía de las formaciones acuíferas de importancia

Unidad geológica	Nombre	Edad	Descripción
QCAL	Depósitos de abanicos aluviales y terrazas	Pleistoceno	Gravas subangulares a angulares en matriz lodosa y arenas
QT	Terrazas	Pleistoceno	Bloques, cantos, gravas y arenas en matriz arcillo-limosa
QLLA	Depósitos de llanura aluvial	Pleistoceno	Arenas de grano fino, limos, arcillas
N2C	Formación Cuesta	Plioceno	Conglomerados y areniscas ferruginosas
N2Q1Z SA	Formación zambrano-sedimentitas de Arjona	Pleistoceno	Conjunto arcilloso de carácter caolinitico y textura vértica y capas aisladas de areniscas calcáreas fosilíferas
E1B	Formación Barco	Paleoceno	Areniscas amarillentas de grano fino.
E1C	Formación Los Cuervos	Paleoceno	Alternancia de arcillolitas y areniscas de grano fino con mantos de carbón
K2L	Formación Luna	Cretácico superior	Lutitas negras carbonosas, limolitas y arcillolitas carbonosas y calizas negras bituminosas
K1R	Formación Río Negro	Cretácico	Cuarzoarenitas de grano grueso, areniscas conglomeráticas y conglomerados, poco cementadas
K1C	Grupo Cogollo	Cretácico	Calizas intercalaciones de lutitas carbonosas

Fuente: elaboración propia.

En la zona de estudio se distinguen dos grupos de acuíferos de acuerdo con su porosidad: 1) grupos de sedimentos de roca porosa de importancia relativa grande a muy pequeña: presentan porosidad primaria y buen potencial como acuíferos. 2) Grupos de roca fracturada y porosa de importancia relativa grande a pequeña: presentan porosidad secundaria producto de la fractura de rocas. La ubicación de estas formaciones se puede observar en la figura 3 y se clasifican en la tabla 2.

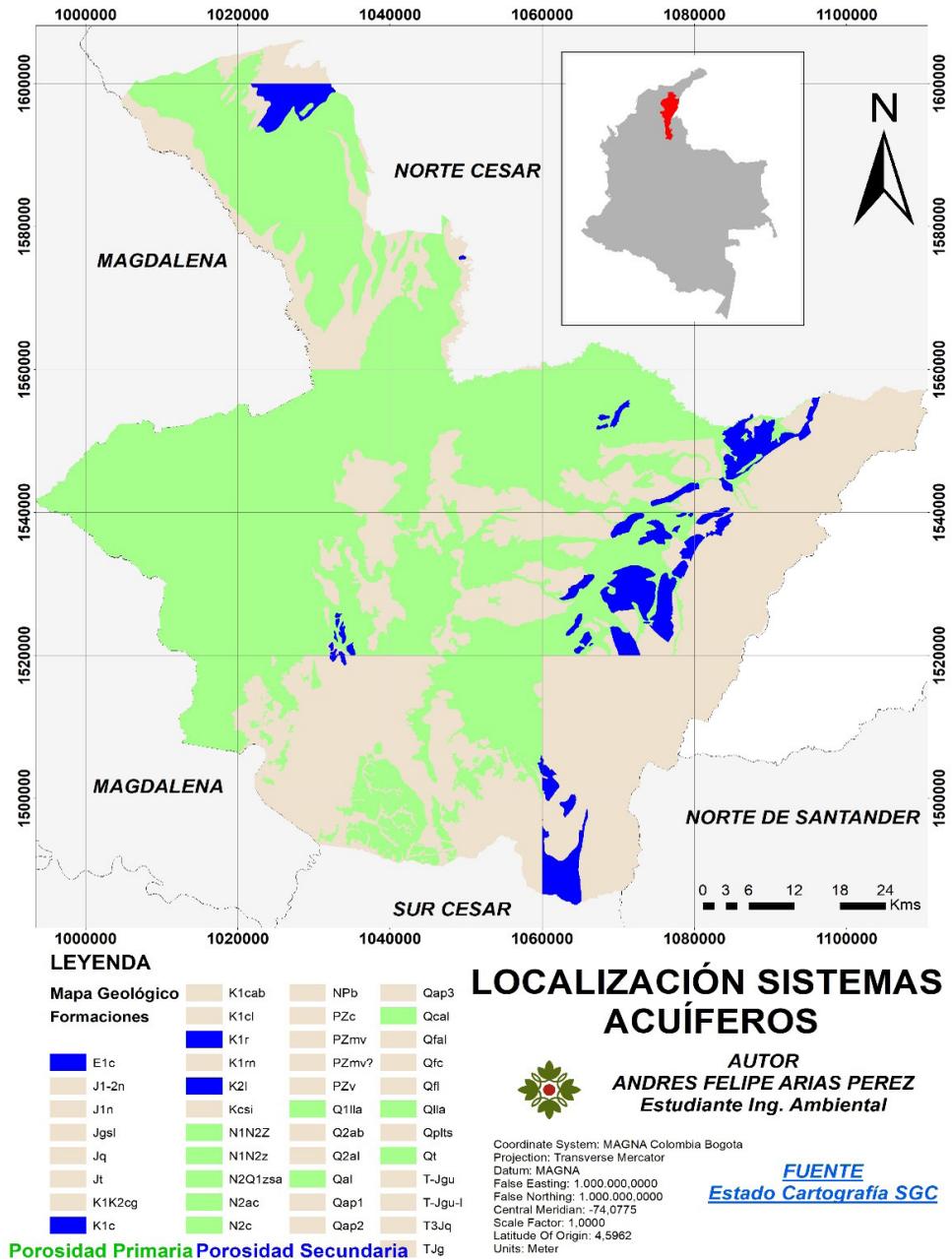


Figura 3. Ubicación de los sistemas acuíferos según su porosidad.  
 Fuente: elaboración propia.

Tabla 2. Tipo de porosidad de las formaciones de importancia acuífera

Formaciones según el tipo de porosidad	
Primaria	Secundaria
Llanura aluvial (QLLA)	Formación Luna (K2L)
Abanicos aluviales (QCAL)	Formación Cogollo (K1C)
Terraza (QT)	Formación Río Negro (K1R)
Formación Arjona (N2Q1Z)	Formación Los Cuervos (E1C)
Formación Cuesta (N1C)	
Formación Barco (E1B)	

Fuente: adaptado de Corpocesar & Ideam 2006.

### 2.2.1.3 Balance hídrico

El balance hídrico es la relación existente entre las pérdidas y los ingresos de agua en el suelo. Las pérdidas en el balance se asocian con la disminución de humedad del suelo directa junto con la transpiración de la vegetación. Siendo la humedad un factor determinante en la recarga directa de los acuíferos, es necesario conocer los valores de evapotranspiración real (ETR) por medio del balance hídrico. Al respecto, autores como Bouwer (1989) concuerdan en que la información de la ET en regiones áridas y semiáridas es un componente significativo para el equilibrio hídrico de la región.

Mediante el balance hídrico se estableció que las zonas de recarga potencial se relacionan con las zonas de excedente con más almacenamiento, que se presenta en los meses de abril a mayo y agosto a noviembre; los meses en los cuales la recarga disminuye en las zonas de uso de reserva y déficit son diciembre a abril y junio a julio (figuras 4 y 5).

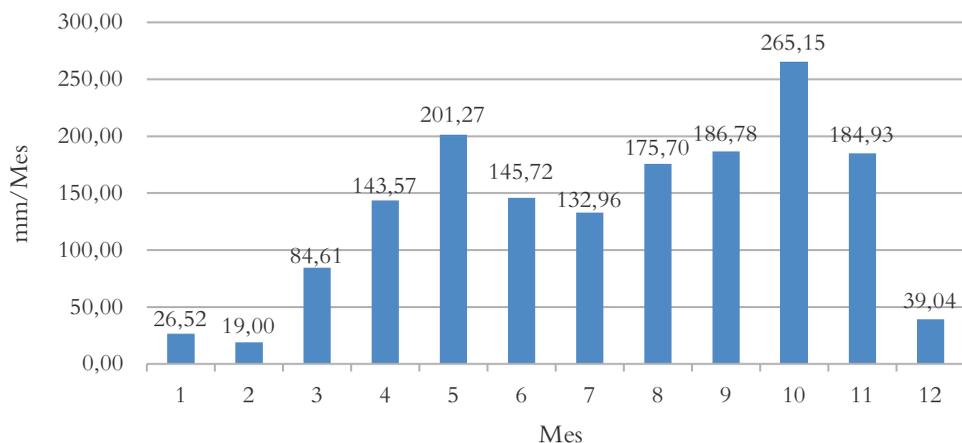
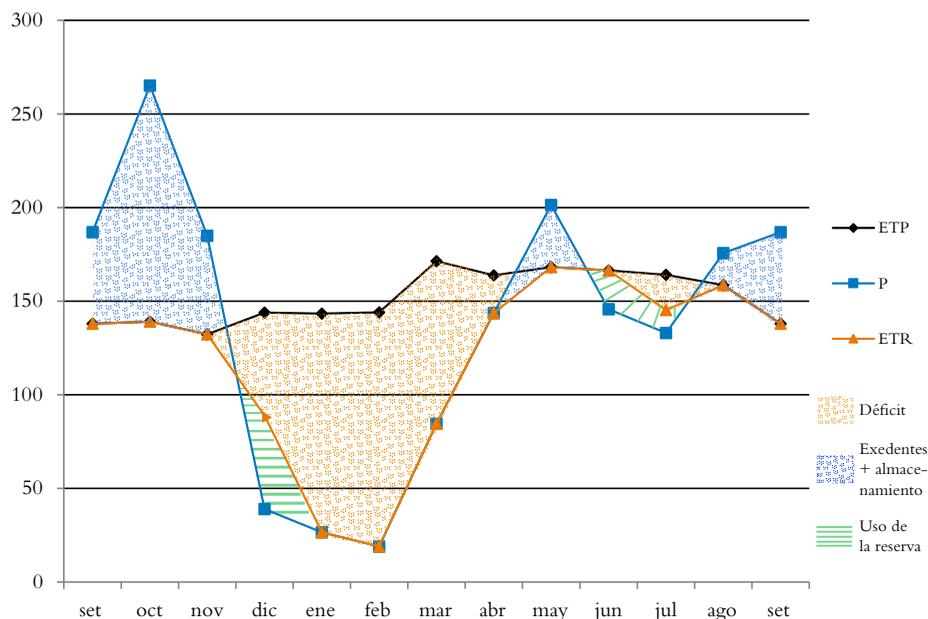


Figura 4. Precipitación mensual multianual en la zona de estudio.

Fuente: elaboración propia a partir de registros multianuales de precipitación del Ideam.



**Figura 5.** Estados del balance hídrico en la zona de estudio.

**Fuente:** elaboración propia a partir de registros multianuales de precipitación del Ideam.

## 2.2.2 Fase 2

### 2.2.2.1 Información de capas ráster y vectoriales

La información específica de los metadatos ráster y vectoriales utilizados para calcular los índices fue la siguiente:

- *Área de estudio:* shape división política de Colombia, descargado del Geoportal del DANE; año de actualización: 2020; sistema de coordenadas trabajado: 3116.
- *Precipitación:* precipitación multianual 2005 a 2020, estaciones pluviométricas CAR: La Primavera, Curumaní, Chimichagua, Poponte, Rincón Hondo, El Canal, La Jagua, Astrea, El Yucal, La Loma, El Paso, El Molino y Hacienda Mature.
- *Geología:* planchas 33, 40, 41, 42, 46, 47, 48, 55 y 56 del SGC; años: 2002 a 2015; sistema de coordenadas trabajado: 3116.
- *DEM:* escena 2011, descargada del portal ASF Data Search; sistema de coordenadas trabajado: 3116.
- *NDVI, NDMI y MNDWI:* escena Landsat 8, nivel 1, correspondiente al 6 de marzo de 2020, descargada del USGS EROS CENTER; SISTEMA de coordenadas trabajado: 3116.

### 2.2.2.2 Normalización de los rangos en los índices elaborados

El índice MNDWI surge por la necesidad de identificar cuerpos de agua, que se pueden distinguir si la información reporta un valor superior a 0. Sin embargo, existe un intervalo entre  $-0,4$  y  $0$  en el que existe un contenido de humedad que se puede tener en cuenta como humedad en el terreno o una llamada *zona anegada*. Por lo tanto, si estas zonas están

situadas sobre un sistema acuífero, serán comprendidas como zonas de recarga directa. La incidencia más alta en la recarga de acuíferos se encuentra en los intervalos de  $-0,02$  a  $1$ .

Tabla 3. Normalización de rangos índice MNDWI

Posición	Rango SIG	Denominación	Incidencia en la recarga
1	$-1 - -0,8$	Zona muy seca	Baja
2	$-0,8 - -0,5$	Zona seca	Baja
3	$-0,5 - -0,4$	Zona de déficit	Media
4	$-0,4 - -0,2$	Zonas de acumulación	Media
5	$-0,2 - -0,01$	Zonas anegadas	Alta
6	$-0,01 - 1$	Cuerpos de agua	Alta

Fuente: elaboración propia.

El índice NDMI se encuentra ligado a la evapotranspiración real (ETR), que es la pérdida de humedad en el terreno que es afectada por el clima de la región, el número de horas de luz y la precipitación. Estos factores determinan períodos en los que la recarga de acuíferos puede ser o no potencial. La incidencia más alta en la recarga de acuíferos se encuentra en los intervalos de  $-0,2$  a  $0,4$  (tabla 4).

Tabla 4. Normalización de rangos índice NDMI

Posición	Rango SIG	Denominación	Incidencia en la recarga
1	$-0,8 - -0,5$	Nula	Baja
2	$-0,5 - -0,4$	Muy baja	Baja
3	$-0,4 - -0,3$	Baja	Baja
4	$-0,3 - -0,2$	Aceptable	Media
5	$-0,2 - 0,01$	Alta	Alta
6	$0,1 - 0,4$	Cuerpo de agua	Alta

Fuente: elaboración propia.

El índice NDVI permite saber el estado de la vegetación. Se ha demostrado que en suelos desnudos la humedad es efímera en comparación con terrenos con índices de vegetación más saludables. La incidencia más alta en la recarga de acuíferos se encuentra en los intervalos de  $0,3$  a  $1$  en este índice (tabla 5).

Tabla 5. Normalización de rangos índice NDVI

Posición	Rango SIG	Denominación	Incidencia en la recarga
1	$1 - 0,7$	Muy saludable	Alta
2	$0,7 - 0,5$	Saludable	Alta
3	$0,5 - 0,3$	Moderado	Alta
4	$0,3 - 0,2$	Estrés hídrico moderado	Baja
5	$0,2 - 0$	Estrés hídrico elevado	Baja
6	$0 - -1$	Cuerpos de agua	Baja

Fuente: elaboración propia.

La pendiente, representada por el modelo digital de elevación DEM, es importante porque la precipitación en zonas de pendientes tiende a convertirse en escorrentía superficial, a diferencia de terrenos llanos, en los cuales la precipitación puede infiltrarse directamente. Es la razón por la cual en zonas de pendientes la humedad es más baja que en las zonas llanas. La incidencia más alta en la recarga de acuíferos se encuentra en los terrenos de planicie ( $0^\circ$  de inclinación) y piedemonte (inclinación de  $7^\circ$  a  $11^\circ$ ) (tabla 6).

Tabla 6. Normalización de rangos DEM

Posición	Rango SIG	Denominación	Incidencia en la recarga
1	$0^\circ$	Planicie	Alta
2	$7^\circ - 11^\circ$	Piedemonte	Media
3	$11^\circ - 19^\circ$	Inclinado	Baja
4	$19^\circ - 30^\circ$	Moderadamente Inclinado	Baja
5	$30^\circ - 40^\circ$	Fuertemente Inclinado	Baja
6	Más de $40^\circ$	Escarpado	Baja

Fuente: elaboración propia.

La precipitación no solo ayuda a la recarga de cuerpos superficiales, sino también a la recarga de aguas subterráneas cuando esta se infiltra; su velocidad depende de la granulometría del terreno. La incidencia más alta en la recarga de acuíferos se encuentra en los intervalos de 1000 mm a 3000 mm de precipitación (tabla 7).

Tabla 7. Normalización de rangos isoyetas

Posición	Rango SIG	Denominación	Incidencia en la recarga
1	0 - 500 mm	Árido	Baja
2	500 - 1000 mm	Muy seco	Baja
3	1000 - 2000 mm	Seco	Media
4	1000 - 2000 mm	Seco	Media
5	1000 - 2000 mm	Seco	Media
6	2000 - 3000 mm	Húmedo	Alta

Fuente: elaboración propia.

### 2.2.2.3 Determinación de la jerarquía mediante la metodología AHP

El método AHP fue presentado por Thomas Saaty en 1980 y se ha usado ampliamente en los estudios relacionados con aguas subterráneas (Arulbalaji *et al.*, 2019). La asociación de los factores considerados se pondera según su importancia en la recarga, ocurrencia y una supervisión de un experto (tabla 8).

Tabla 8. Cálculo de la jerarquía de las capas de información por el método AHP

Atributos		IP	NV	GE	DM	NM	MW	Peso	Puesto
Isoyetas	IP	1	-1/3	-1/7	-1/5	1	1	7,01	5
NDVI	NV	3	1	-1/3	3	-1/3	-1/3	8,93	3
GEOLÓGIA	GE	7	3	1	9	3	3	35,14	1
DEM	DM	5	-1/3	-1/9	1	-1/5	-1/5	7,13	4
NDMI	NM	1	3	3	5	1	1	20,90	2
MNDWI	MW	1	3	3	5	1	1	20,90	2

Fuente: elaboración propia.

### 3. Resultados y discusión

#### 3.1 Relaciones fundamentales en la recarga directa de los acuíferos

##### 3.1.1 Geología-MNDWI

Se identifican cuatro zonas, que configuran acuíferos de acuerdo con sus características granulométricas (Corpocesar & Ideam, 2011): 1) F la Cuesta, 2) F los Cuervos, 3) Qlla-llanura aluvial y 4) F Luna y Qlla (figura 6). Dado que esta información concuerda con los lugares que presentan altos índice en el mapa MNDWI, se puede afirmar que la recarga de estos acuíferos se hace de manera directa a través de zonas anegadas. Teniendo en cuenta la época del año en que se hace el análisis de este índice, tiene mucha más relevancia, dado que el mes de marzo pertenece a la temporada seca en los municipios de estudio, con tan solo 84,6 mm en el recuento histórico de la precipitación.

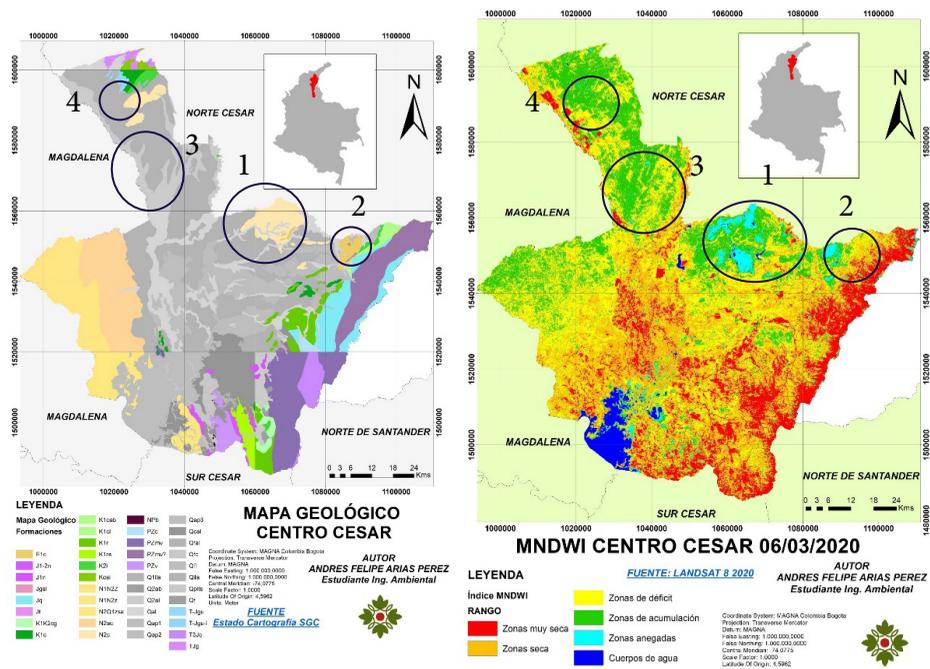


Figura 6. Comparación MNDWI-Geología.  
Fuente: elaboración propia en ARCGIS.

### 3.1.2 Geología-NDMI

Los puntos de mayor humedad en la zona de estudio concuerdan con los acuíferos identificados en el trabajo de Corpocesar y el Ideam en el 2006. La numeración en el mapa de humedad se asocia con un sistema acuífero de la siguiente forma: 1) N2c F. Cuesta, E1c F. Cuervo y Q1a Depósitos de llanura aluvial. 2) Q1a Depósito de llanura aluvial; E1c F. Los Cuervos, Qt Terrazas aluviales y K2l F. La Luna. 3) Q1a Depósitos de llanura aluvial. 4) N2c F. Cuesta, Q1a Depósitos de llanura aluvial y K1c Grupo Cogollo. 5) N2Q1z F. Arjona. (6) Q1a Depósito de llanura aluvial y K1r F. Río Negro (figura 7). Existe una fuerte relación de la humedad con la granulometría de la zona de estudio, aunque los valores más altos de humedad rondaron los 0,5 en la escala de -1 a 1. Estos valores se presentan en un mes considerado como seco, pero en épocas lluviosas estos valores escalan hasta 0,85, ocasiones en las que existe una recarga potencial.



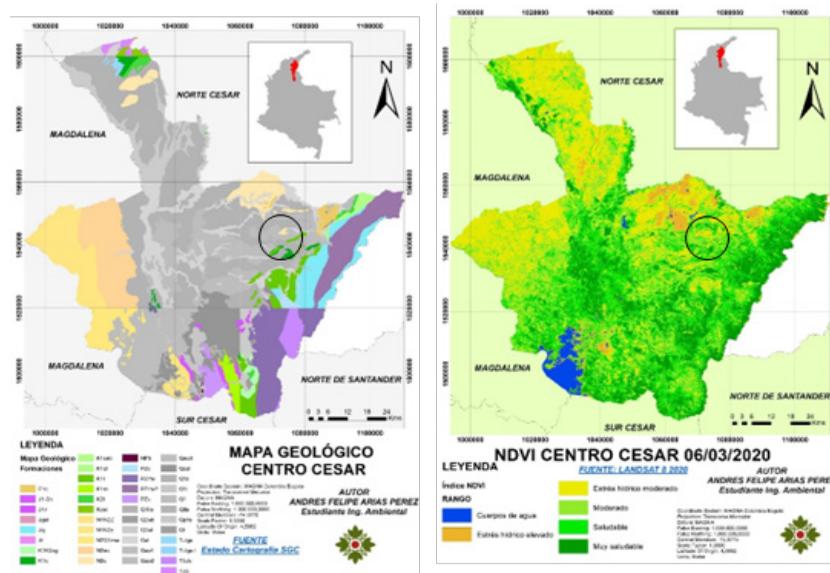


Figura 8. Comparación Geología-NDVI.  
 Fuente: elaboración propia en ARCGIS.

### 3.2 Superposición de mapas según pesos calculados

Mediante la herramienta Weighted Overlay se superpusieron los datos ráster y vectoriales utilizando la escala de medición en común, que son las clases según su potencial de recarga directa: cuerpos de agua alta, aceptable, baja, muy baja y nula. Los pesos que se introdujeron en la herramienta fueron los calculados en el método AHP. El resultado de esta herramienta arroja el mapa de potencial de recarga directa de la zona de estudio (figura 9).

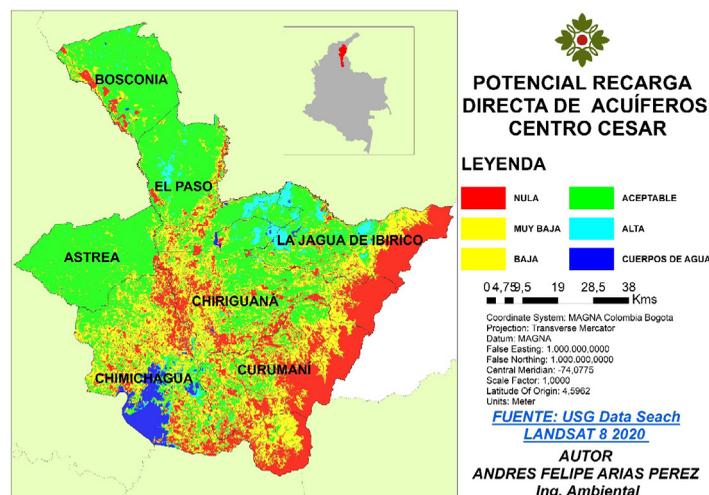


Figura 9. Zonas con mayor potencial de recarga directa.  
 Fuente: elaboración propia en ARCGIS.

El resultado es un mapa clasificado por clases según su potencial de recarga directa. Los cuerpos de agua están representados por las zonas en donde la humedad es muy alta sin importar la época del año, que no se pueden considerar como zonas de recarga directa de acuíferos, pues su tipo de recarga se considera desde fuentes superficiales (Escobar *et al.*, 2017). El área de los cuerpos de agua en la zona de estudio es de 161 km<sup>2</sup>, que corresponde al 2,5% del territorio; el cuerpo de agua ubicado al SO es la ciénega de Zapatosa.

La zona con mayor importancia en esta categoría es la que se considera alta, en la cual realmente se evidencia que la geología, la humedad, la pendiente, la vegetación y la precipitación favorecen la recarga directa. El área total de esta categoría es de 220 km<sup>2</sup>, que comprende el 3,55% de la zona de estudio. Es importante mencionar que en estas zonas ya se han reconocido sistemas acuíferos como F. Cuesta, F. Cuervos, Llanuras y terrazas aluviales, que se encuentran en los municipios de Bosconia, El Paso, Astrea y La Jagua de Ibirico.

La zona considerada como aceptable es una categoría que en la fecha del análisis no presentó valores altos, pero que en temporada de lluvia también evidencia recarga directa, específicamente en los meses de agosto a noviembre, en donde la capacidad de campo y la evapotranspiración permiten que el agua se pueda infiltrar y recargar sistemas acuíferos como: F. Río Negro, F. Cogollo, F. Arjona y Llanura aluvial. El área de la zona considerada aceptable corresponde a 2768 km<sup>2</sup>, que representa el 44,85% del área de estudio.

Las zonas consideradas baja, muy baja y nula son parte de una categoría en la geología que no es favorable para la infiltración, no acumula humedad, son zonas de pendientes pronunciadas y la mayoría de la precipitación se convierte en escorrentía, mas no en infiltración; esta zona no presenta ningún interés para la recarga directa de los sistemas acuíferos. El área de esta categoría corresponde a 3046 km<sup>2</sup>, que representa el 49,1% de la zona de estudio.

## 4. Conclusiones

La técnica decisión multicriterio (AHP) permite configurar una superposición idónea de capas temáticas trabajadas con SIG para determinar las zonas de recarga directa de los acuíferos. De acuerdo con estos análisis, los municipios que agrupan mayor potencial de recarga son: Bosconia, El Paso, Astrea y La Jagua de Ibirico, mientras que las zonas con potenciales más bajos se agrupan principalmente en: Chiriguaná, Chimichagua y Curumaní.

El balance hídrico realizado para identificar las zonas con mayor potencial de recarga directa de acuíferos arroja que los meses de agosto a noviembre son favorables para este tipo de recarga, pues estas zonas se encuentran en un período de almacenamiento y excedentes que se transforman en recarga directa de los acuíferos libres que se encuentran cerca de superficie. Las zonas categorizadas con un alto potencial de recarga reportaron niveles de humedad significativos, teniendo en cuenta que se hizo el estudio en temporada seca. Estas zonas corresponden al 3,55% del área analizada, mientras que las zonas clasificadas como aceptables son muy afectadas por el estrés hídrico de la temporada. Sin embargo, en los meses de almacenamiento y excedentes, se convierten en zonas con un potencial alto de recarga directa; estas zonas corresponden al 44,85% de la zona de estudio.

## Agradecimientos

Mi profundo agradecimiento a la Universidad Central, a todos los profesores que me ayudaron en la construcción de conocimiento, en especial a mi director, Douglas Quintero, y mi codirector, Jhon Jairo Castañeda, por guiarme en este gran proceso de investigación.

## Referencias

- Adham, M. I., Jahan, C. S., Mazumder, Q. H., Hossain, M. M. A., & Haque, A. M. (2010). Study on groundwater recharge potentiality of Barind Tract, Rajshahi District, Bangladesh using GIS and Remote Sensing technique. *Journal of the Geological Society of India*, 75, 432-438. <https://link.springer.com/article/10.1007/s12594-010-0039-3>
- Ahuja, L. R., Wendroth, O., & Nielsen, D. R. (1993). Relationship between initial drainage of surface soil and average profile saturated conductivity. *Soil Science Society of America Journal*, 57, 19-25. <https://doi.org/10.2136/sssaj1993.03615995005700010005x>.
- Arulbalaji, P., Padmalal, D., & Sreelash, K. (2019). GIS and AHP techniques-based delineation of groundwater potential zones: A case study from Southern Western Ghats, India. *Scientific Reports*, 9, Article 2082. <https://www.nature.com/articles/s41598-019-38567-x>
- Arya, L. M., Richter, J. C., & Paris, J. F. (1993). Estimating profile water storage from surface zone soil moisture measurements under bare field conditions. *Water Resources Research*, 19, 403-412. <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/WR019i002p00403>
- Bagyaraj, M., Tenaw Mengistie, A., Gnanachandrasamy, G., & Gemechu, B. (2019). Data of remote sensing and GIS - to demarcate the potential sector of groundwater in Debre Berhan, Amhara region, Ethiopia. *Data in Brief*, 26, Article 104542. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2019.104542>
- Borja Pimienta, L., Beltrão Santos, N. E., Da Silva Gemaque, A. M., & Tavares, P. A. (2019). Processo Analítico Hierárquico (AHP) em ambiente SIG: Temáticas e aplicações voltadas à tomada de decisão utilizando critérios espaciais. *Interações*, 20(2), 407-420. <https://doi.org/10.20435/inter.v20i2.1856>
- Bouwer, H. (1989). Estimating and enhancing groundwater recharge. En M. L. Sharma (Ed.), *Groundwater recharge* (pp. 1-10). CRC Press.
- Corpocesar, & Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [Ideam]. (2006). *Aprovechamiento y protección integral del agua subterránea en las cuencas de los valles de los ríos Cesar y Magdalena, Departamento del Cesar* [Archivos Corpocesar, n.º 40]. <https://www.corpocesar.gov.co/subterraneeas.html>
- Corpocesar, & Instituto Nacional de investigaciones Geológico Mineras [Ingeominas]. (1995). *Evaluación de aguas subterráneas en el departamento del Cesar* [Informe final]. <https://www.corpocesar.gov.co/evaluacion-aguas-subterraneeas.html>

- Elbeih, S. F. (2015). An overview of integrated remote sensing and GIS for groundwater mapping in Egypt. *Ain Shams Engineering Journal*, 6(1), 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2014.08.008>
- Escobar, J., Betancur, T., García, E., Martínez, C., & Palacio, P. (2017). Análisis jerárquico ponderado aplicado a la identificación de recarga y flujos regionales en acuíferos. *Revista Politécnica*, 13(24), 37-48. <https://revistas.elpoli.edu.co/index.php/pol/article/view/1089>
- Fallatah, O. A., Ahmed, M., Cardace, D., Boving, T., & Akanda, A. S. (2019). Assessment of modern recharge to arid region aquifers using an integrated geophysical, geochemical, and remote sensing approach. *Journal of Hydrology*, 569, 600-611. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.09.061>
- Hurtado, T., & Bruno, G. (2005). El Proceso de Análisis Jerárquico (AHP) como herramienta para la toma de decisiones en la selección de proveedores [Monografía, Universidad Nacional Mayor de San Marcos]. Repositorio UNMSM. <https://bit.ly/3yAXpnI>
- Jackson, T. J. (2002). Remote sensing of soil moisture: Implications for groundwater recharge. *Hydrogeology Journal*, 10, 40-51. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10040-001-0168-2>
- Parks, S., Byrnes, J., Abdelsalam, M. G., Laó Dávila, D. A., Atekwana, E. A., & Atya, M. A. (2017). Assessing groundwater accessibility in the Kharga Basin, Egypt: A remote sensing approach. *Journal of African Earth Sciences*, 136, 272-281. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2016.11.002>
- Senthilkumar, M., Gnanasundar, D., & Arumugam, R. (2019). Identifying groundwater recharge zones using remote sensing & GIS techniques in Amaravathi aquifer system, Tamil Nadu, South India. *Sustainable Environment Research*, 29, Article 15. <https://doi.org/10.1186/s42834-019-0014-7>
- Villanueva, H., Tovar-Cabañas, R., & Vargas-Castilleja, R. (2019). Classification of aquifers in the Mina field, Nuevo Leon, using geographic information systems. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 10(3), 96-121. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2019-03-05>

# Modelo para la evaluación dinámica de la gestión de residuos peligrosos en Colombia y su aporte al cambio climático

Dynamic evaluation model for hazardous waste management and its contribution to climate change in Colombia

Raiza Alexandra Jiménez Bermúdez<sup>\*</sup>, Karen Dayana Quilaguy Salamanca<sup>\*\*</sup>  
y Diana Alexandra Romero Carrillo<sup>\*\*\*</sup>

---

---

## Cómo citar:

Jiménez Bermúdez, R. A., Quilaguy Salamanca, K. D., & Romero Carrillo, D. A. (2020). Modelo para la evaluación dinámica de la gestión de residuos peligrosos en Colombia y su aporte al cambio climático. *Ingeciencia*, 5, 43-56

- \* Estudiante de octavo semestre de Ingeniería Ambiental, Universidad Central.  
Correo: rjimenezb@ucentral.edu.co
- \*\* Estudiante de octavo semestre de Ingeniería Ambiental, Universidad Central.  
Correo: kquilaguys@ucentral.edu.co
- \*\*\* Estudiante de octavo semestre de Ingeniería Ambiental, Universidad Central.  
Correo: dromeroc5@ucentral.edu.co

## Resumen

Se construyó un modelo para hacer la evaluación dinámica de la gestión de residuos peligrosos en Colombia y su influencia en el cambio climático. Con este propósito se usó la metodología de dinámica de sistemas para analizar tres escenarios de gestión: el primero presenta una disminución del 20% en la tasa de generación; el segundo proyecta un aumento del 30% de la tasa de aprovechamiento, y el tercero prevé un incremento del 20% de la tasa de generación. Los resultados demuestran la importancia y urgencia de crear estrategias de gestión de los residuos peligrosos (RESPEL) desde todas sus fuentes, así como intensificar y fortalecer la normativa y su cumplimiento. Especialmente, es necesario impulsar el aprovechamiento de los RESPEL para disminuir los gases efecto invernadero (GEI). Esta investigación aporta un modelo relacional entre los residuos peligrosos y las emisiones que promueven el cambio climático, de manera que constituye una primera aproximación a la estimación de la generación de GEI.

**Palabras clave:** calentamiento global, dinámica de sistemas, gases efecto invernadero, incineración, residuos peligrosos.

---

## Abstract

A model was built to make a dynamic evaluation of hazardous waste management in Colombia and its influence on climate change. With this objective, the system dynamics methodology was used to analyze three management scenarios: the first one presents a 20% decrease in the generation rate; the second one projects a 30% increase in the utilization rate, and the third one foresees a 20% increase in the generation rate. The results demonstrate the importance and urgency of creating hazardous waste management strategies (RESPEL) from all sources, as well as intensifying and strengthening regulations and their enforcement. In particular, it is necessary to promote the use of RESPEL to reduce greenhouse gases (GHG). This research provides a relational model between hazardous wastes and emissions that promote climate change, thus constituting a first approximation to the estimation of GHG generation.

**Keywords:** dynamic model, global warming, greenhouse gases, incineration, hazardous waste, system dynamics.

## 1. Introducción

Los residuos peligrosos son aquellos que por su composición química, física y/o biológica pueden generar efectos adversos para el hombre y el ambiente (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [Ideam], 2012). Estos residuos son resultado de la impureza de los productos que se emplean en las actividades industriales, agrícolas, de servicios e incluso domésticas (Sistema de Información Ambiental de Colombia [SIAC], s. f.), sus características o las sustancias que se generan al finalizar su vida útil, así como de las deficiencias en las prácticas operacionales.

La preocupación del mundo por el efecto de los residuos peligrosos se refleja en el Convenio de Basilea, el cual tiene como objetivo proteger a la humanidad y su entorno de sus efectos. Para ello, solicita a los países que son miembros de este acuerdo presentar informes de generación anuales, que deben construir con base en el listado de clasificación propuesto sobre residuos peligrosos, con el fin de estimar su desarrollo e impacto por almacenamiento o tratamiento.

Prácticas inadecuadas en la disposición final o en el tratamiento de los residuos peligrosos pueden generar contaminación en el aire y afectar el agua subterránea. De hecho, entre los efectos directos de los residuos peligrosos se encuentra el calentamiento global, debido a que durante la incineración se liberan gases efecto invernadero como el  $\text{CH}_4$ ,  $\text{NO}_2$  y  $\text{CO}_2$  (Ideam *et al.*, 2015). Por ejemplo, la contaminación secundaria emitida por los incineradores de desechos peligrosos (HWI) puede generar riesgos potenciales para las poblaciones circundantes y el medio ambiente. De hecho, aunque la contribución de las emisiones contaminantes de estos incineradores al aire local normalmente solo representa una pequeña proporción del total, los altos niveles de contaminación secundaria, como los metales pesados y las dibenzo-p-dioxinas y dibenzofuranos policlorados (PCDD/F) en los gases de escape, clasifican como riesgo para la salud de las poblaciones circundantes (Wang *et al.*, 2020). Un estudio más específico en China que evaluó los impactos ambientales de un HWI durante su ciclo de vida (LCA) concluyó que la incineración de residuos industriales peligrosos tiene un gran impacto en la toxicidad del medio ambiente y en el calentamiento global (Wenjuan *et al.*, 2013).

En América, particularmente, se ha observado un avance en la forma como se maneja el ciclo de estas sustancias. Por ejemplo, Chile construyó un modelo de gestión ambiental adecuada con el objetivo de evitar que los países subdesarrollados se conviertan en paraísos de la contaminación, para lo cual estableció que los sectores industriales con mayores cifras de contaminantes tendrían una menor expansión, mientras que se promovería a los que tuvieran un enfoque de reducción (Foa, 2016). En este sentido, Muñoz (1995), citando a Birdsall y Wheeler, resalta la importancia de realizar inversiones en tecnologías limpias, provenientes de países con normas ambientales estrictas (pp. 377-378).

Argentina, por su lado, apuntó a un vínculo entre la política ambiental y la política económica, para lo cual estableció el principio de que “el que contamina paga” (Salassa, 2016) en el modelo de acumulación y producción enfocado en la industrialización por sustitución de importaciones (Basualdo, 2011). También desde el campo de la gestión, Maniero *et al.* (2019) advierten que en Brasil el modelo de manejo consiste en que los

1 De acuerdo con el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), las tecnologías limpias son aquellas que aplican la ecoeficiencia a procesos, productos y servicios.

trabajadores hacen un proceso de selección manual de los residuos, de modo que estos quedan expuestos al ambiente y a las personas antes de que se almacenen los que no pueden ser reciclados, la mayoría peligrosos, en una zona carente de las condiciones en las que deberían estar.

En Colombia estos residuos tomaron relevancia después de que se evidenciara que se estaban acumulando en los puertos debido a su importación para reciclaje (“Desechos tóxicos...”, 1995). Con el propósito de detener el tráfico de estos elementos tóxicos, el país se unió al Convenio de Basilea (Ley 253 de 1996) y ha presentado los correspondientes informes de generación, los cuales le han permitido plantear estrategias para que las autoridades ambientales cumplan los objetivos de vigilancia y control de los residuos peligrosos. Así lo establece el Plan de Gestión de Residuos Peligrosos y Especiales, establecido en el Decreto 1076 de 2015, el cual busca minimizar los riesgos y los costos asociados al ciclo de gestión, específicamente a los de movilización.

En el 2018 el Ideam registró que el país generó 635 518 toneladas de residuos peligrosos, para una población de 49 834 000 personas, lo cual significó un aumento del 30% con respecto a lo registrado en el año 2017, cuando se produjeron 489 058 toneladas provenientes de una población de 49 292 000 habitantes. Este incremento se presenta geográficamente en las regiones de Santander y de Antioquia para el sector de hidrocarburos (Ideam, 2011).

El presente estudio tiene como objetivo principal presentar una relación directa entre los residuos peligrosos y los gases efecto invernadero como factor del cambio climático, además de analizar la gestión de estos como causal de la acumulación de material y generación de gases contaminantes.

## 2. Metodología

El trabajo usó como metodología la dinámica de sistemas, la cual se caracteriza por la retroalimentación a partir de una teoría de control, el retardo de tiempo, la no linealidad y las estructuras de bucles de sistemas tanto complejos como dinámicos (Bala, 2018). Con base en esta perspectiva, la metodología se dividió en tres etapas: revisión bibliográfica, contextualización de la información en Colombia y diseño del modelo.

## 3. Resultados

### 3.1 Revisión bibliográfica

En esta etapa se hizo una revisión de literatura de acuerdo con los criterios establecidos en la tabla 1.

Tabla 1. Revisión de la literatura

Ítem	Descripción
Pregunta	¿Cuál es el comportamiento del sistema de los desechos peligrosos? ¿Cuál es el efecto que tienen sobre el cambio climático?
Palabras clave	Español: desechos peligrosos, calentamiento global, cambio climático Inglés: <i>hazardous waste, global warming, climate change.</i>
Expresión booleana	(TITLE-ABS-KEY (“hazardous waste”) AND TITLE-ABS-KEY (“global warming”)) AND PUBYEAR > 2014
Base de datos	Scopus
Período	2015-2020
Criterio de selección	Los artículos debían tener el siguiente enfoque: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Daño al medio ambiente.</li> <li>• Cambio climático.</li> <li>• Alternativas de gestión de residuos peligrosos.</li> <li>• Con base en lo anterior, se descartó el material de investigaciones en el área de la medicina.</li> </ul>
Resultado	30 documentos

Fuente: elaboración propia.

En cuanto a la gestión de residuos, Sukholthaman y Sharp (2016) exponen avances relevantes en la vida útil de un relleno sanitario en Bangkok (Tailandia) gracias a un modelo que propone diferentes escenarios de separación desde la fuente. En un acercamiento al sector industrial, Ding *et al.* (2016) plantean un modelo para gestionar los residuos de construcción que haga frente a los efectos de un relleno sanitario deficiente: contaminación de aguas subterráneas, disminución de la fertilidad de los suelos y contribución al cambio climático debido a la cantidad de contaminantes que son liberados a la atmósfera. De hecho, se debe tener en cuenta que por cada tonelada de columna de residuos procesados en un vertedero se producen 200 libras de emisiones de CO<sub>2</sub> potencialmente contribuyentes al calentamiento global (Levis, 2008).

Desde una perspectiva práctica, Sufian y Bala (2007) realizaron un modelo de gestión de residuos sólidos para la ciudad de Dhaka (Bangladesh). En esta propuesta se busca generar energía a partir de los residuos como alternativa para mitigar los impactos ambientales. Se basa en una de las metodologías más usadas en el tratamiento de residuos, la incineración, proceso que consiste en la combustión controlada de residuos con el fin de reducir su peso y volumen, así como de destruir la mayor parte de los contaminantes. Sin embargo, el producto final de esta incineración son compuestos como el CO<sub>2</sub>, vapor de agua o hidrocarburos en los gases. Esta incineración propicia el aumento de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y representa el 93% del total de emisiones de una incineradora.

Además, aunque la energía producida, conocida como *energía verde*, puede ser recuperada en distintas formas: calor, electricidad o cogeneración (procedimiento mediante el cual

se obtiene simultáneamente energía eléctrica y energía térmica útil), estas plantas suelen emplear combustibles auxiliares debido a la baja eficiencia energética, lo cual hace que la mayoría de la energía que generan se utilice en esta, además de producir emisiones de CO<sub>2</sub> mayores a plantas térmicas de gas o carbón (Greenpeace, 2009).

Ahora bien, en cuanto a residuos peligrosos se refiere, muchas de las industrias encargadas de las incineraciones no reportan las cifras reales de este tipo de residuos para no sobrepasar los índices de normativa para GEI, de manera que no se registran completamente los diferentes elementos resultantes: CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O y CH<sub>4</sub>, siendo este último uno de los principales causantes del cambio climático (Emplea Verde *et al.*, 2010).

### 3.2. Contextualización en Colombia

Respecto a la contextualización del problema, en la revisión bibliográfica se encontró un reportaje de la revista *Semana* (2014) que explica cómo se manejan los residuos peligrosos en el país, para lo cual hace un seguimiento al modelo de la empresa Tecniamsa Bogotá: el proceso comienza con la recepción de los residuos que han sido estudiados previamente por personal técnico. Cuando llegan a la planta, se hace el pesaje en una báscula calibrada y se inspeccionan los vehículos que los trasladaron. Luego, los residuos se llevan a la zona temporal, en donde son ubicados de acuerdo con su compatibilidad química para trasladarlos a la planta de incineración o llevarlos posteriormente a la celda de seguridad. Si se decide incinerarlos, los desechos se colocan en un horno a temperaturas que oscilan entre los 800 °C y los 1000 °C para lograr la destrucción térmica de estos materiales y/o sustancias. Si se van a almacenar, la planta de incineración tiene diferentes cuartos para guardar residuos de carácter industrial y cuartos fríos para los patógenos.

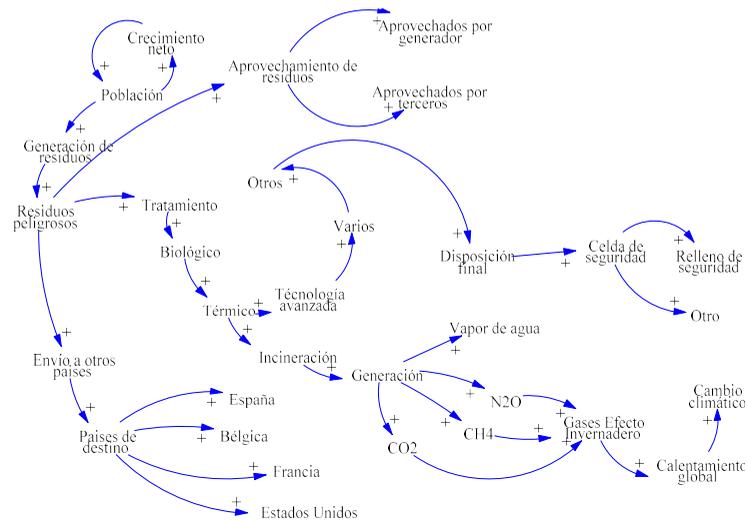
Los residuos que superan los valores permitidos para la incineración deben ser tratados, con el fin de disminuir sus valores de toxicidad. Posteriormente, son depositados en una celda de seguridad, la cual consiste en un terreno amplio que cuenta con características geológicas ideales para el proceso (poca infiltración), debido a que, si bien se hace un recubrimiento con geomembrana y otros materiales como arcilla para evitar el contacto entre los residuos y el suelo, aún existe la posibilidad de que entren en contacto (Canal 22, 2018).

### 3.3 Diseño del modelo con base en la dinámica de sistemas

En esta etapa de la investigación se consultaron los informes nacionales de generación y manejo de residuos o desechos peligrosos en Colombia (informes RESPEL), los reportes elaborados en cumplimiento del Convenio de Basilea y la base de datos mundial. Estos documentos proporcionaron la información acerca de la cantidad de residuos peligrosos generados en el país, así como su división en aprovechamiento, tratamiento y disposición final.

También se consultó información del Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE) para analizar el crecimiento poblacional, los informes del cambio climático del Ideam y la normativa y regulación de la gestión de los residuos establecida por el Ministerio del Ambiente.

Con base en esta información, se seleccionó el rango de datos de 2010–2018 para hacer una proyección del incremento de residuos, sus efectos y manejo a medida que aumenta la población (figura 1). Específicamente, se clasificaron en dos grandes grupos: residuos no peligrosos y residuos peligrosos; la investigación se centró en este último.



**Figura 1.** Modelo aplicando la dinámica de sistemas.

**Fuente:** elaboración propia.

Teniendo en cuenta el modelo, se puede observar que el proceso se divide en tres opciones: la primera es cuando los residuos peligrosos son enviados a otros países, en este caso a Francia o Bélgica, para que sean tratados con diferentes técnicas o tecnologías avanzadas y tengan una disposición final. La segunda es el aprovechamiento del residuo peligroso, ya sea por las entidades que lo generan o por terceros. En esta alternativa el aprovechamiento realizado por el generador o aprovechamiento interno corresponde a las operaciones o procesos mediante los cuales se modifican las características de los residuos en el interior del establecimiento donde fueron generados, mientras que el realizado por terceros se denomina *aprovechamiento externo* y consiste en las operaciones que se hacen fuera de la instalación donde fueron generados. Por ejemplo, se pueden aprovechar materiales como reciclaje de baterías usadas, plomo, ácido etc.

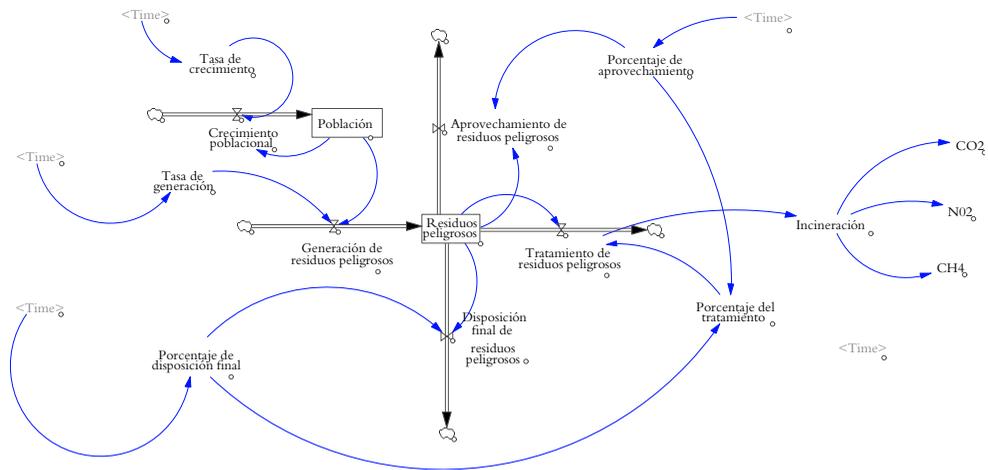
En la tercera opción se realiza un tratamiento para modificar las características de los residuos peligrosos teniendo en cuenta el riesgo y el grado de peligrosidad que representan, para incrementar sus posibilidades de aprovechamiento o para minimizar los riesgos para la salud humana y el ambiente. Dependiendo el tipo de residuo peligroso, se hará uno de los siguientes tipos de tratamiento:

- *Biológico*, que corresponde a las mezclas y emulsiones de desechos de aceite y agua o de hidrocarburos, y aceites minerales.
- *Térmico*, en el cual predomina el realizado por terceros.
- *Tecnologías avanzadas*, que en su mayoría emplean residuos del sector de hidrocarburos, la utilización de varios tratamientos u otro tipo de tratamiento, como la incineración de los residuos peligrosos.

Finalmente, la disposición final tiene el objetivo de aislar y confinar los residuos peligrosos, en especial los no aprovechables, en lugares especialmente seleccionados, diseñados y debidamente autorizados, para evitar la contaminación y los daños o riesgos a la salud humana y al ambiente. Entre las opciones de operaciones de disposición final se encuentra la celda de seguridad, el relleno de seguridad u otro tipo de disposición final diferente a las nombradas anteriormente.

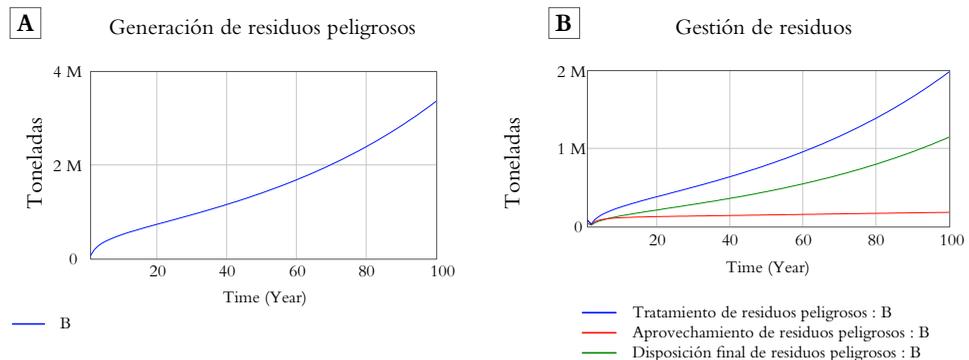
### 3.3.1 Modelo de niveles y flujos

El modelo de niveles y flujos (figura 2) se creó de acuerdo con las tasas de crecimiento de la población, con la finalidad de determinar la cantidad de residuos peligrosos producidos por dicha población mediante una tasa de generación. Una vez definida la tasa de generación, se calculó la cantidad estimada de residuos peligrosos producidos, de los cuales una parte pasa a una etapa de tratamiento, otra a aprovechamiento y otra a disposición final. Cada uno de los porcentajes de tratamiento, aprovechamiento y disposición final van ligados a un tiempo: consideramos un período de cien años para hacer la estimación de cada uno y ligamos el tiempo a la población para estimar la cantidad de residuos peligrosos generados a partir del crecimiento poblacional presentado.



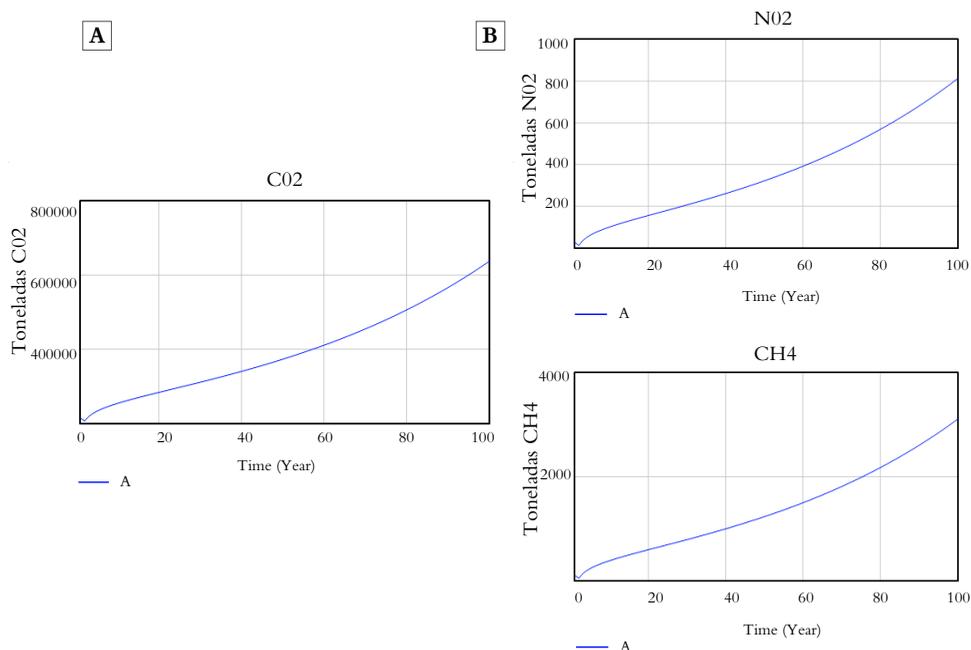
**Figura 2.** Modelo de niveles y flujos para residuos peligrosos.  
Fuente: elaboración propia.

En la figura 3 se presentan los resultados de la aplicación del modelo con una proyección de cien años. El diagrama muestra un comportamiento exponencial en la generación y gestión de estos residuos, y resalta que la metodología más utilizada será el tratamiento, que manejará más de 2,25 millones de toneladas.



**Figura 3.** Desarrollo del modelo. a) La generación de residuos peligrosos seguirá en aumento a medida que avance el tiempo; b) Gestión de residuos peligrosos.  
Fuente: elaboración propia.

A partir de los resultados anteriores, el modelo se enfocó en el tratamiento por incineración, la metodología más contaminante, pues genera altas concentraciones de gases efecto invernadero  $\text{CO}_2$ ,  $\text{NO}_2$  y  $\text{CH}_4$ . De acuerdo con el análisis, al final del año proyectado se alcanzarán más de 400 000 toneladas de  $\text{CO}_2$ , 800 toneladas de  $\text{NO}_2$  y aproximadamente 30 000 toneladas de  $\text{CH}_4$  (figura 4).

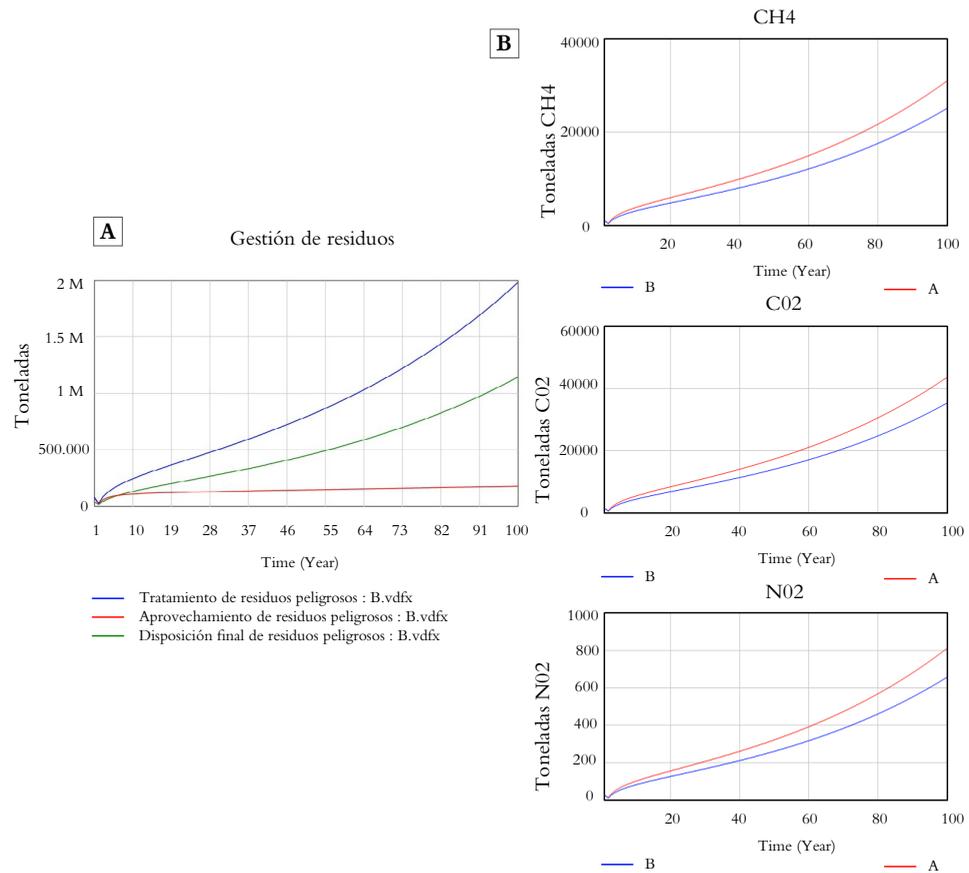


**Figura 4.** Generación de GEI por incineración. a) Comportamiento del contaminante  $\text{CO}_2$ ; b) Comportamiento de los contaminantes  $\text{NO}_2$ , que son menores en comparación con c) los del  $\text{CH}_4$ . Fuente: elaboración propia.

Posteriormente, se evaluó el comportamiento de los residuos peligrosos en tres escenarios: en el primero, se logra una disminución del 20% en la tasa de generación como consecuencia de realizar la separación desde la fuente y evitar la contaminación de materiales que entran en contacto. En el segundo, se plantea un aumento del 30% en la tasa de aprovechamiento, impulsado por la búsqueda que haría el sector industrial para encontrar diferentes alternativas de reutilización de los materiales, con lo cual se beneficia el ambiente y su economía. En el tercero, se establece un aumento del 20% en la tasa de generación debido a una segunda ola industrial-tecnológica con productos con menor vida útil.

### 3.3.1.1 Primer escenario

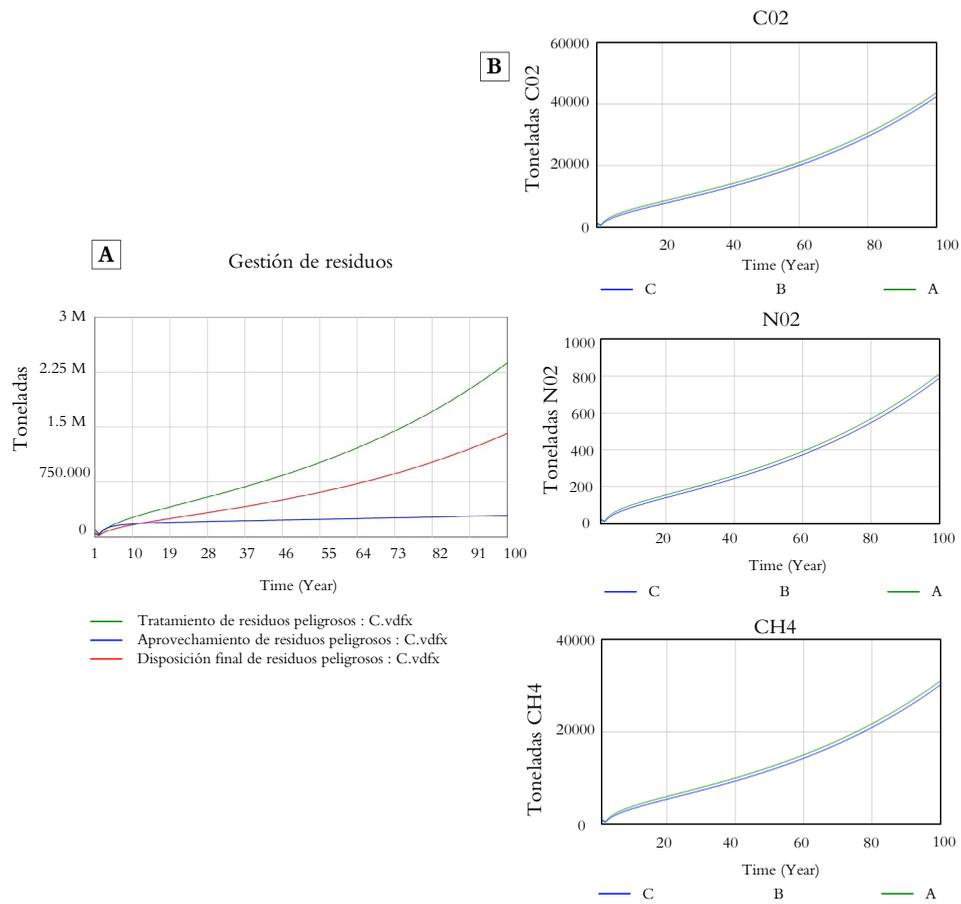
De acuerdo con las condiciones establecidas para este escenario en los análisis anteriores, se proyecta un comportamiento exponencial para el tratamiento y la disposición final (figura 5a); este escenario se diferencia del original, con una disminución aproximada de 0,25 millones de toneladas en las áreas mencionadas. En el caso del aprovechamiento, se observa un ligero aumento en comparación con el desarrollo del modelo en condiciones normales. Con base en lo anterior, se decidió comparar los gases generados por incineración en las condiciones normales del desarrollo del modelo (A) con la disminución del 20% (B). Si bien se obtuvo un comportamiento similar, empieza a notarse una mejora a partir del año 40 (figura 5b).



**Figura 5.** Desarrollo del primer escenario. a) Gestión de residuos; b) Contaminantes  $CO_2$ ,  $NO_2$  y  $CH_4$ .  
Fuente: elaboración propia.

### 3.3.1.2 Segundo escenario

Con las condiciones establecidas para el segundo escenario, se proyecta un comportamiento similar al escenario original, con la diferencia de que el aprovechamiento empieza a ser más relevante, pues se logra disminuir ligeramente las cantidades manejadas por el tratamiento y la disposición final (figura 6a). La comparación del escenario original (A) y el segundo escenario (C) para los contaminantes liberados por incineración muestra un comportamiento similar, con el último escenario levemente por debajo, pero se empiezan a notar mejores resultados en el año cien, principalmente en el  $CO_2$  y  $NO_2$  (figura 6b).



**Figura 6.** Desarrollo del segundo escenario. a) Gestión de residuos; b) Contaminantes  $CO_2$ ,  $NO_2$  y  $CH_4$ .  
Fuente: elaboración propia.

### 3.3.1.3 Tercer escenario

Con base en las condiciones establecidas en los análisis anteriores, los resultados del tercer escenario muestran un comportamiento similar al escenario original (figura 7a). Sin embargo, la diferencia es más notoria al analizar las concentraciones de los contaminantes por la incineración entre los escenarios, pues se proyecta un significativo incremento en el tercer escenario (D), con un aumento a 100 000 toneladas para el  $CO_2$ , 200 toneladas para el  $NO_2$  y aproximadamente 10 000 toneladas para el  $CH_4$  (figura 7b).

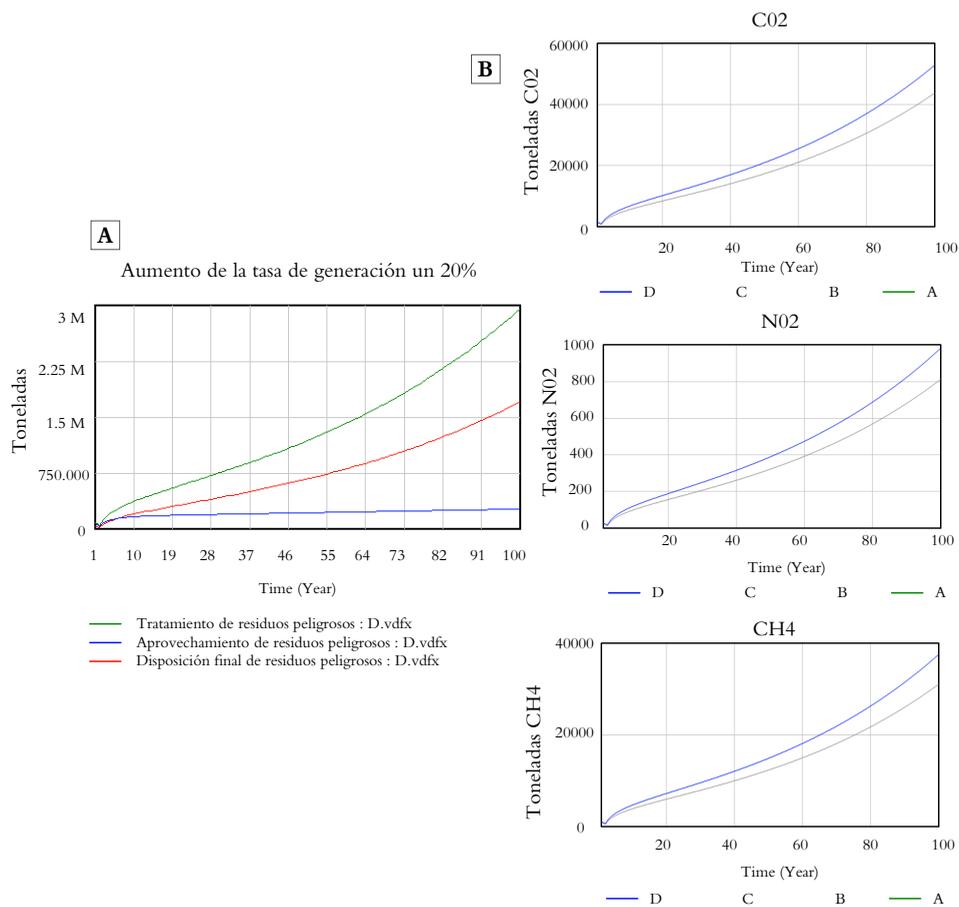


Figura 7. Desarrollo del tercer escenario. a) Gestión de residuos; b) Contaminantes CO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub>. Fuente: elaboración propia.

### 3. Conclusiones

El análisis de la información que arroja el modelo sobre la dinámica para los residuos peligrosos a cien años permite concluir que si se reduce la tasa de generación y se incentiva el aprovechamiento, las emisiones de GEI disminuirán. De igual forma, con base en el análisis de los datos y la comparación de las emisiones resultantes del tratamiento y/o aprovechamiento de los residuos, se puede afirmar que los residuos peligrosos sí contribuyen de manera relevante a la generación de GEI, incluyendo las actividades de disposición final.

Los resultados de la evaluación y comparación del escenario general con los escenarios planteados indican que habrá un aumento exponencial del volumen de los residuos, debido al incremento en la elaboración de productos y en el consumo del ser humano. Si continúan las mismas condiciones en las que se ha desarrollado la gestión de residuos peligrosos en Colombia durante los últimos años, esto provocará que los efectos en el ecosistema sean mayores.

Actualmente, se presume la llegada de una segunda ola industrial y electrónica, razón por la cual el tercer escenario toma relevancia con la estimación de la generación de GEI.

Según la tendencia de tratamiento de estos residuos, un alto porcentaje entrará en los procesos de incineración, lo cual se traduce en un ambiente propicio para que haya un aumento significativo de los GEI. Tomando en cuenta lo anterior, se sugiere una actualización de la normativa que promueva el aprovechamiento de parte de los grandes generadores, con el objetivo de disminuir los efectos adversos en el medio ambiente, como es el cambio climático.

## Agradecimientos

Queremos dar un sincero agradecimiento al docente Gabriel Castelblanco por la orientación y el acompañamiento a lo largo del desarrollo del presente trabajo; a la Universidad Central por el reconocimiento y el apoyo que brindó para dar a conocer el arduo trabajo realizado, y, finalmente, a la revista *Ingeciencia* por la oportunidad de divulgar la investigación.

## 4. Referencias

- Bala, B. K., Arshad, F. M., & Noh, K. M. (2017). *System dynamics*. Springer.
- Banco Mundial. (2018). What a waste 2.0: A global snapshot of solid waste management to 2050. <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/30317>
- Basualdo, E. (2001). *Sistema político y modelo de acumulación y sistema político en la Argentina: Notas sobre el transformismo argentino durante la valorización financiera (1976-2001)*. Universidad Nacional de Quilmes.
- Canal 22. (2018, febrero 1). *Residuos peligrosos* [Video]. [https://youtu.be/VQLN-dDbW\\_xw](https://youtu.be/VQLN-dDbW_xw)
- Desechos tóxicos: Peligran los puertos. (1995, junio 8). *El Tiempo*. <https://www.eltiempo.com/archivo/documento/MAM-499283>
- Ding, Z., Yi, G., Tam, V. W. Y., & Huang, T. (2016). A system dynamics-based environmental performance simulation of construction waste reduction management in China. *Waste Management*, 51, 130-141. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.03.001>
- El negocio de los residuos peligrosos. (2014, septiembre 30). *Semana*. <https://bit.ly/3AeL3my>
- Emplea Verde, ISWA, Unión Europea Fondo Social Europeo, Fundación Biodiversidad, & ATEGRUS. (2010). *Cambio climático y gestión de residuos: "Impactos positivos y negativos de la gestión de residuos sobre el cambio climático"*. <https://bit.ly/3PeVBqb>
- Foa Torres, J. G. (2016). Lógica de la gestión ambientalmente adecuada y patrón de desarrollo sustentable en América Latina: El tema emblemático de las políticas de residuos peligrosos en Argentina en los años 90. *Luna Azul*, 42, 293-318. <https://doi.org/10.17151/luaz.2016.42.18>
- Greenpeace España (2009). *Incineración de residuos: Malos humos para el clima*. Greenpeace España. <https://bit.ly/3OETcVx>

- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [Ideam]. (2012). *Informe nacional generación y manejo de residuos o desechos peligrosos en Colombia – año 2011*. Ideam. <https://bit.ly/3OUWGTz>
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [Ideam], Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo [PNUD], Ministerio de Ambiente y Desarrollo Rural [MADS], Departamento Nacional de Planeación [DNP], & Cancillería. (2015). *Inventario nacional de gases de efecto invernadero (GEI) de Colombia: Tercera comunicación nacional de cambio climático de Colombia*. Ideam. <https://bit.ly/3RgL7bF>
- Levis, J. W. (2008). *A life-cycle analysis of alternatives for the management of waste hot-mix asphalt, commercial food waste, and construction and demolition waste* [Tesis de maestría, North Carolina State University]. Repositorio NCSU. <https://repository.lib.ncsu.edu/handle/1840.16/2701>
- Ley 253 de 1996. Por medio de la cual se aprueba el Convenio de Basilea sobre el control de los movimientos transfronterizos de los desechos peligrosos y su eliminación, hecho en Basilea el 22 de marzo de 1989. Congreso de la República de Colombia.
- Maniero Moreira, A. M., Risso Günther, W. M., & Gomes Siqueira, C. E. (2019). Workers' perception of hazards on recycling sorting facilities in São Paulo, Brazil. *Ciência & Saúde Coletiva*, 24(3), 771-780. <https://doi.org/10.1590/1413-81232018243.01852017>
- Muñoz, H. (1995). Una perspectiva chilena sobre comercio internacional y medio ambiente. En E. Bec (Ed.), *Comercio internacional y medio ambiente: Derecho, economía y política* (pp. 367-379). Espacio-CIEL.
- Salassa Boix, R. (2016). Tributos ambientales: La aplicación coordinada de los principios quien contamina paga y de capacidad contributiva. *Revista Chilena de Derecho*, 43(3), 1005-1030. <https://doi.org/10.4067/S0718-34372016000300010>
- Sistema de Información Ambiental de Colombia [SIAC]. (s. f.). Residuos peligrosos. <http://www.siac.gov.co/residuos>
- Sufian, M. A., & Bala, B. K. (2007). Modeling of urban solid waste management system: The case of Dhaka city. *Waste Management*, 27(7), 858-868. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2006.04.011>
- Sukholthaman, P., & Sharp, A. (2016). A system dynamics model to evaluate effects of source separation of municipal solid waste management: A case of Bangkok, Thailand. *Waste Management*, 52, 50-61. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.03.026>
- Wang, C., Shaoa, N., Xu, J., Shang, Z., & Cai, Z. (2020). Pollution emission characteristics, distribution of heavy metals, and particle morphologies in a hazardous waste incinerator processing phenolic waste. *Journal of Hazardous Materials*, 388, Article 121751. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121751>
- Wenjuan, L., Huang, Q., Lu, S., Wu, H. L., Li, X., & Yan., J. (2013). Life cycle assessment of the environmental impacts of typical industrial hazardous waste incineration in eastern China. *Aerosol and Air Quality Research*, 15, 242-251. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2013.10.0318>

# Infecciones respiratorias agudas (IRA) por efecto de las emisiones y escorrentía superficial de PM10 atribuidos al parque automotor en Bogotá

IRA cases due to the effect of PM10 emissions and surface  
runoff attributed to the automotive park in Bogotá

Angie Katherin Lache Peñaranda\*, Gabriel Ernesto Castelblanco Bolívar\*\*  
y Juan David Barón Prada\*\*\*

---

---

## Cómo citar:

Lache Peñaranda, A. K., Castelblanco Bolívar, G. E., & Barón Prada, J. D. (2020). Infecciones respiratorias agudas (IRA) por efecto de las emisiones y escorrentía superficial de PM10 atribuidos al parque automotor en Bogotá. *Ingeciencia*, 5, 57-80.

\* Estudiante de Ingeniería Ambiental, Universidad Central. Correo: [alache@ucentral.edu.co](mailto:alache@ucentral.edu.co)  
\*\* Docente de la Universidad Central. Correo: [gabrielecb@gmail.com](mailto:gabrielecb@gmail.com)  
\*\*\* Estudiante de Ingeniería Ambiental, Universidad Central. Correo: [jbaronp@ucentral.edu.co](mailto:jbaronp@ucentral.edu.co)

## Resumen

Bogotá ha sobrepasado los límites de concentración de PM10 recomendados por la Organización Mundial de la Salud (OMS), lo que agudiza sus impactos en la salud y el medio ambiente. Esta investigación busca modelar el impacto de las emisiones de PM10 por el parque automotor en Bogotá sobre los casos de infección respiratoria aguda (IRA) y la concentración de metales pesados (plomo, cobre, zinc y cadmio) en el agua superficial mediante un modelo de dinámica de sistemas en el *software* Vensim. Con este fin, se modelaron tres escenarios. El primero se basa en la continuidad de las condiciones actuales; el segundo contempla una flota 100% eléctrica, y el tercer escenario, intermedio, consiste en una flota pública (1% Euro V, 15% articulados eléctricos y 84% Euro VI) y una flota privada (50% de carros y motos eléctricos). En cada escenario se confirmó un impacto proporcional a las emisiones de PM10. Se demuestra que conviene incrementar la proporción de vehículos que trabajan con motores eléctricos o híbridos para disminuir el nivel de contaminación atmosférica e hídrica, así como los casos de IRA.

**Palabras clave:** dinámica de sistemas, escorrentía urbana, infecciones respiratorias agudas (IRA), metales pesados, parque automotor, PM10.

## Abstract

Bogotá has exceeded the PM10 concentration limits recommended by the World Health Organization (WHO), which exacerbates its impacts on health and the environment. This research means to model the impact of PM10 emissions from the automotive fleet in Bogotá on ARI cases and the concentration of heavy metals (lead, copper, zinc, and cadmium) in surface using a system dynamics model in the Vesim software. To this end, three modeling scenarios were proposed. The first is based on the continuity of the current conditions; the second contemplates a 100% electric fleet; and an intermediate scenario, consisting of a public fleet: 1% Euro V, 15% electric articulated and 84% Euro VI, and 50% of electric cars and motorcycles. For each of the scenarios, the proportional impact to emissions were confirmed. The present study demonstrates the urgency of increasing the proportion of electric or hybrid vehicles to reduce the cases of ARI, and the atmospheric and water pollution.

**Keywords:** acute respiratory infections (ARI), heavy metal, PM10, system dynamics, urban runoff, vehicle fleet.

## 1. Introducción

De acuerdo con un comunicado de prensa, en Ginebra, Suiza, la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2016) estimó que cerca del 90% de las muertes relacionadas con la contaminación del aire se producen en países de ingresos bajos y medianos, y casi dos de cada tres suceden en las regiones de Asia Sudoriental y del Pacífico Occidental. En América Latina y el Caribe, más de cien millones de personas están expuestas a niveles de contaminación del aire por encima de los recomendados por la OMS (Cifuentes *et al.*, 2005).

Los grupos más vulnerables a los efectos dañinos de una mala calidad del aire incluyen niños, adultos mayores, personas con problemas previos de salud y población de bajos estratos socioeconómicos. De hecho, se ha establecido que para el 2050 la contaminación del aire será el principal causante de mortalidad prematura. Esto no solo afecta la salud, sino también la economía de cada país, pues las pérdidas por dichas emisiones pueden llegar a representar hasta el 2% del Producto Interno Bruto (PIB) de cada nación, justificados en gastos médicos y pérdida de productividad (Clean Air Institute, 2013).

Debido al enorme deterioro de la calidad del aire en Bogotá, la afectación a la salud respiratoria constituye el efecto más significativo en la salud (Leal & Castelblanco, 2020). Estos niveles de contaminación generan efectos cuantificados y no cuantificados en la calidad de vida, por lo cual las autoridades ambientales y de salud pública de la ciudad han buscado limitarla de distintas formas. Al respecto se puede consultar el trabajo de Torres (2010), quien realizó un diagnóstico de los altos y persistentes niveles de material particulado (PM) emitidos por fuentes móviles en Bogotá.

Según la Secretaría Distrital de Movilidad (2017), en un día hábil se realizan 13 325 901 viajes, principalmente entre hogar, estudio y trabajo; de las personas que viven en la ciudad, aproximadamente el 43% usa transporte público SITP-TPC, el 23% lo hace de forma peatonal, el 12% en automóvil y el 5% en motocicleta (Clean Air Institute, 2013). Además, Gaitán *et al.* (2007) demostraron que las concentraciones atmosféricas de material particulado superan los valores establecidos por la reglamentación ambiental de la ciudad.

Adicionalmente, la concentración de la población mundial en las ciudades y su consecuente expansión han tenido un gran impacto en el drenaje urbano (Harremoës, 1997). Dicho proceso acelerado de urbanización ha impactado de diversas maneras las cuencas urbanas, principalmente en el aumento de los caudales por los altos volúmenes de escorrentía, debido a una enorme disminución de las tasas de infiltración, por efecto de la impermeabilización del suelo (Fletcher *et al.*, 2013).

Cuando ocurre un evento de precipitación, parte del material particulado se traslada de la atmósfera a la escorrentía (Hvitved-Jacobsen *et al.*, 2010), lo cual afecta las aguas superficiales (Walsh & Kunapo, 2009) y a los mantos acuíferos (Gromaire-Mertz *et al.*, 1999). Del mismo modo, las aguas lluvias de escorrentía sobre superficies urbanas son consideradas la mayor fuente de distribución de metales pesados en las aguas superficiales (Zhang *et al.*, 2012). Como consecuencia, la contaminación causada por el agua de escorrentía constituye un gran problema en las áreas urbanas y cuerpos de agua adyacentes a las ciudades, ya que las emisiones de los vehículos incluyen diferentes contaminantes, como metales pesados, aceite y grasa, partículas de fuentes como combustibles, desgaste de las pastillas de freno y de los neumáticos y basura (Kim *et al.*, 2005).

La escorrentía urbana se considera una fuente de contaminación de difícil localización, ya que se origina en áreas extensas; su vertido es intermitente, ligado a un fenómeno aleatorio, la lluvia, variable en el tiempo, difícil de muestrear en origen y relacionada con el uso del suelo (Lee *et al.*, 2020); por esto, es reconocida como una de las principales fuentes de contaminación difusa en las ciudades.

La presente investigación aborda el diagnóstico y los antecedentes respecto a la cantidad de emisiones de PM10 del parque automotor en Bogotá y su relación con la presencia de metales pesados en los cuerpos de agua superficiales como plomo (Pb), cadmio (Cd), cobre (Cu) y zinc (Zn); así mismo, la incidencia en el aumento de casos de Infecciones Respiratorias Agudas (IRA) en la ciudad. Para dicho propósito se construyó un modelo de simulación que permite conceptualizar, documentar, simular, analizar y optimizar modelos de dinámica de sistemas sobre la emisión de PM10.

## 2. Materiales y métodos

La metodología empleada para definir el modelo está basada en la metodología de dinámica de sistemas según Bilash *et al.* (2017). A continuación, se describen las etapas de la investigación.

### 2.1 Identificación del problema y análisis del comportamiento

El paso más importante en el modelado es identificar el problema, puesto que se enfoca en caracterizar qué aspectos del funcionamiento del sistema es necesario atender. Con este fin se describen las variables clave de entrada para el sistema y se establecen los límites de acuerdo con las preguntas específicas para las cuales se busca una respuesta. Específicamente, la pregunta de investigación fue: ¿Cómo se asocian las emisiones de PM10 y el crecimiento del parque automotor que fomentan, alteran o provocan desequilibrio en el ambiente, con la calidad del aire, la salud de los habitantes y la calidad de las aguas superficiales?

### 2.2 Desarrollo de una hipótesis dinámica que explique la causa del problema

La hipótesis que se plantea es que, en Bogotá, el flujo masivo de los medios de transporte que utilizan fuentes de gasolina y biodiésel para funcionar son sistemas que producen co-lateralmente PM10, el cual crece progresivamente y se asocia con el incremento de casos de IRA y la presencia de metales pesados en los cuerpos de agua superficiales.

### 2.3 Estimación de parámetros

El objetivo de la estimación de parámetros es obtener los valores de los efectos directos incluidos en el modelo. Para el cálculo de las emisiones de PM10 se utilizó el factor de emisión (t/km\*vehículo), factor de actividad (km/año) y la cantidad de vehículos por categorías. Estos valores se multiplican para encontrar la emisión (ecuación 1), de tal forma que:

$$\text{Toneladas de PM10} = \frac{\text{t}}{\text{km} * \text{vehículo}} \cdot \frac{\text{km}}{\text{año}} \cdot \text{Vehículo} \quad \text{Ecuación 1}$$

En el caso de la relación entre el crecimiento de la población y el parque automotor, se empleó la ecuación 2, de correlación, a partir del historial de ambas variables desde el año 2007 hasta el año 2017 con un coeficiente de correlación ( $R^2$ ) alto, en donde el parque automotor es la variable dependiente y la población es la variable independiente.

$$\text{Parque automotor} = 1,3085 \text{ Población} - 8E+06, R^2 = 0,9912 \quad \text{Ecuación 2}$$

## 2.4 Validación de modelos, análisis de sensibilidad y análisis de políticas

Las pruebas para fomentar la confianza en el modelo de dinámica de sistemas consisten en validación, análisis de sensibilidad y análisis de políticas de modelos de dinámica de sistemas. El objetivo de esta fase es generar confianza en el modelo. Se verifica la sintaxis y la coherencia dimensional del conjunto de ecuaciones sistémicas que constituyen el modelo; se valida que el modelo responde al comportamiento especificado con los modos de referencia y se analiza la sensibilidad del modelo.

## 3. Resultados

El modelo de simulación realizado en este estudio fue postulado con base en las emisiones de material particulado de 10 micrómetros o menos aportados por la relación existente entre el crecimiento de la población y el parque automotor, con el fin de determinar la influencia de las emisiones sobre la afectación a la salud pública de acuerdo con los casos de Infección Respiratoria Aguda (IRA) y la concentración de los metales Pb, Zn, Cu y Cd en la escorrentía en la ciudad de Bogotá.

### 3.1 Definición de las variables del modelo y diagrama Forrester

Se identificaron datos relacionados con las emisiones de PM10 del parque automotor en el período de 2007 al 2017, lo cual permitió estructurar un modelo que refleja la situación actual y viabilizar proyecciones más acertadas de acuerdo con la alta correlación esperada entre el historial de la población y el historial del parque automotor en la ciudad de Bogotá (figura 1). Dichos datos fueron relacionados en la estructura del modelo como variables de flujo o variables auxiliares, junto con variables calculadas mediante ecuaciones que integran las regresiones realizadas en Excel (tabla 1).



VARIABLES	Fórmula	Unidades	Valor	Fuente de datos
Emisión O	Diésel gasolina ACC * Factor de emisión O * Factor de actividad O	t/año		Secretaría Distrital de Movilidad
% eléctricos ACC	0.0005 * (Time^2) – 0.002 * Time + 0.0019	Vehículos	843	Secretaría Distrital de Movilidad
Emisión E	Eléctricos ACC* Factor de emision E*Factor de activi- dad E	t/año		Secretaría Distrital de Movilidad
Emisiones Automoviles	Emisión E + emisión O	t/año		Secretaría Distrital de Movilidad
Motos	0.3912*Población – 3e + 06	Vehículos	464 634	Secretaría Distrital de Movilidad
% Motos eléctricas	0.0042 * Time +0.0004	Vehículos	550	Secretaría Distrital de Movilidad
Emision E	M eléctricas * Factor E eléctricas * Factor actividad E	t/año	0	Secretaría Distrital de Movilidad
% M gasolina	100 – “% M. eléc- tricas”	Vehículos	549 986	Secretaría Distrital de Movilidad
Factor E gasolina		t/km * veh	2,54E-7	Secretaría Distrital de Movilidad
Factor actividad G		km/año	16 457	Secretaría Distrital de Movilidad
Emisión G	Factor E gasolina * Factor actividad G * M Gasolina	t/año		Secretaría Distrital de Movilidad
Emisiones de las motocicletas	“% M. gasolina” * Factor actividad G * “Factor E. gasolina” * Motos	t/año		Secretaría Distrital de Movilidad
Transporte público	Componente Zonal + Público colectivo + Taxis + Trasmilenio	Vehículos		Secretaría Distrital de Movilidad
Trasmilenio	Renovación flota -Salida por renova- ción	Vehículos	2851	Secretaría Distrital de Movilidad
Renovación de la flota	Euro VI + Euro V	Vehículos	1441	Trasmilenio S.A.
Salida por renovación	Euro II + Euro III	Vehículos	1162	Trasmilenio S.A.
Euro II		Vehículos	724	Trasmilenio S.A.
Euro III		Vehículos	438	Trasmilenio S.A.
Euro V		Vehículos	700	Trasmilenio S.A.
Factor E euro V		t/km * veh	1,41E-7	Trasmilenio S.A.
Factor actividad E V		km/año	156 339	Trasmilenio S.A.

VARIABLES	Fórmula	Unidades	Valor	Fuente de datos
Emisión V	$\text{Euro V} * \text{Factor actividad E V} * \text{"Factor E. euro V"}$	t/año		Transmilenio S.A.
Euro VI		Vehículos	741	Transmilenio S.A.
Factor E euro VI		t/km * veh	4,30E-8	Transmilenio S.A.
Factor actividad E VI		km/año	156339	Transmilenio S.A.
Emisión VI	$\text{Euro VI} * \text{Factor actividad E VI} * \text{Factor E Euro VI}$	t/año		Transmilenio S.A.
Emisiones Trasmilenio	$\text{Emisión Euro V} + \text{Emisión Euro VI}$	t/año	4768	Transmilenio S.A.
Componente zonal	$\text{IF THEN ELSE ( (2435,1 * LN (Time) - 1959,6) < 988 988, 2435,1 * LN(-Time) - 1959,6 )}$	Vehículos	6678	Transmilenio S.A.
Factor E Z		t/km * veh	3,37E-7	Transmilenio S.A.
Factor actividad zonal		km/año	128564	Transmilenio S.A.
Acumulado emisión Z	$\text{"Componente Zonal"} * \text{Factor actividad Z} * \text{"Factor E."}$	Ton/año	2349	Transmilenio S.A.
Público colectivo	$6017 * \text{logaritmo natural (Time)} + 21967$	Vehículos	5835	Transmilenio S.A.
Factor EPC		t/km * veh	8,98E-7	Transmilenio S.A.
Factor actividad colectivo		km/año	45484	Transmilenio S.A.
Acumulado emisión PC	$\text{Factor actividad PC} * \text{Factor E PC} * \text{Público colectivo}$	t/año	2561	Transmilenio S.A.
Taxis	$41.628 * \text{LN(Time)} + 51515$	Vehículos		Secretaría Distrital de Movilidad
Factor E taxis		t/km * veh	2,30E-6	Secretaría Distrital de Movilidad
Factor actividad taxis		km/año	78932	Secretaría Distrital de Movilidad
Acumulado emisión taxis	$\text{Factor actividad taxis} * \text{Factor E taxis} * \text{Taxis}$	t/año	2978	Secretaría Distrital de Movilidad
Emisión transporte público	$\text{Acumulado emisión PC} + \text{Acumulado emisión Z} + \text{Acumulado emisión Taxis} + \text{"Emisiones Trasmilenio"}$	t/año		Secretaría Distrital de Movilidad
Incremento PM10	$\text{Emisión motocicletas} + \text{"Emisión transporte público"} + \text{Emisión ACC}$	t/año		Secretaría Distrital de Movilidad

VARIABLES	Fórmula	Unidades	Valor	Fuente de datos
Total emisiones PM10 fuentes móviles	INT(incremento pm10 – Disipación1)	t/año		Secretaría Distrital de Movilidad
Disipación	Total emisiones pm10 fuentes móviles / Tiempo de disipación	pm10/año		Secretaría Distrital de Movilidad
Tiempo de disipación		año	109	Secretaría Distrital de Movilidad
Relación de casos IRA/PM10		Casos/pm10	4	Secretaría Distrital de Movilidad
Incremento de casos IRA	Relación casos IRA / PM10 * Total emisiones pm10 fuentes móviles	Casos		Secretaría Distrital de Movilidad
IRA acumulado	Incremento casos IRA	Casos	272	Secretaría Distrital de Movilidad
Carga Pb por emisión		mg/t	0,173	Secretaría Distrital de Movilidad
Carga Zn por emisión		mg/t	0,334	Secretaría Distrital de Movilidad
Carga Cu por emisión		mg/t	0,060	Secretaría Distrital de Movilidad
Carga Cd por emisión		mg/t	0,329	Secretaría Distrital de Movilidad
Carga Pb	Carga Pb por emisión * Total emisiones pm10 fuentes móviles	mg/año		Autores
Carga Zn	Carga Zn por emisión * Total emisiones pm10 fuentes móviles	mg/año		Autores
Carga Cu	Carga Cu por emisión * Total emisiones pm10 fuentes móviles	mg/año		Autores
Carga Cd por emisión	Carga Cd por emisión * Total emisiones pm10 fuentes móviles	mg/año		Autores
[Pd]	(Carga Pb / Precipitación Media anual) / 1000	mg/L		Autores
[Zn]	(Carga Zn / Precipitación media anual) / 1000	mg/L		Autores
[Cu]	(Carga Cu / Precipitación media anual) / 1000	mg/L		Autores

VARIABLES	FÓRMULA	UNIDADES	VALOR	FUENTE DE DATOS
[Cd]	(Carga Cd / Precipitación media anual) / 1000	mg/L		Autores
Precipitación Media Anual		L	0,719	Ideam

Fuente: elaboración propia.

### 3.2 Definición del modelo formal en dinámica de sistemas

Como resultado del modelo de simulación, se plantearon diferentes escenarios para determinar y comprender las causas estructurales del comportamiento del sistema, así como para mostrar la afectación directa a la salud pública por el aumento de IRA atribuida al PM10 emitido por el parque automotor y también las grandes concentraciones de metales pesados como Pb, Zn, Cu y Cd que llegan a los cuerpos hídricos por efecto de la escorrentía cuando se combina la lluvia y la emisión de estas partículas. Esto implica aumentar el conocimiento sobre el papel de cada elemento del sistema y ver cómo diferentes acciones, efectuadas sobre partes del sistema, acentúan o atenúan las tendencias de comportamiento implícitas en este.

### 3.3 Definición de escenarios de análisis del modelo

Para evaluar los impactos en el largo plazo de las emisiones de PM10 se propusieron tres escenarios en el modelo. El primero asume que la tendencia histórica de emisiones de PM10 y del comportamiento del parque automotor entre el 2007 y el 2017 se sostiene en el tiempo. Los resultados de la simulación demuestran que si la mayoría de los vehículos sigue haciendo uso de combustibles fósiles, los casos de IRA aumentarán; este escenario es el menos deseable. Variables como % Diésel ACC, % Eléctricos ACC, % Diésel motos, % Eléctricos motos, Euro V y Euro VI demuestran el desfavorable escenario o estado actual de la problemática y las posibles alternativas en el cambio del parque automotor.

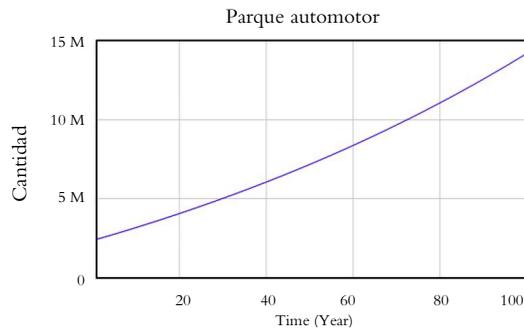
El segundo escenario consiste en una transición paulatina hacia la sostenibilidad del parque automotor, hasta que el 100% del este funcione con motores eléctricos. Esta posibilidad se proyecta a largo plazo, debido a que actualmente no se ha generado mayor interés en Colombia para poder realizar esta renovación. La simulación y los datos muestran cómo la disponibilidad de coches eléctricos y el factor de adquisición o accesibilidad económica en Bogotá y en Colombia, en general, no es el mismo que en países desarrollados.

El tercero es un escenario intermedio, denominado en la simulación como “alcanzable”. Específicamente, plantea un parque automotor con las siguientes características: en primera instancia, flota pública: 1% Euro V, 15% articulados eléctricos y 84% Euro VI, y en segunda instancia, flota privada: 50% de carros y motos eléctricos. En este escenario se hace más que evidente que la cantidad de los buses colectivos disminuirá y pasarán a ser reemplazados por el Sistema Integrado de Transporte Público (SITP), de manera que lo ideal sería contemplar un escenario de movilidad con tecnología Euro VI y eléctrico. Se considera que es un escenario alcanzable, debido a que la transición es más realista y se puede financiar por etapas, además se espera que los costos para adquirir esta tecnología sean menores.

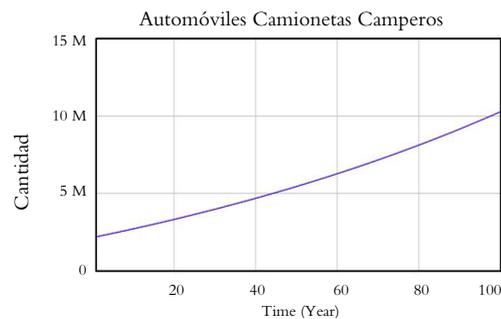
### 3.4 Simulación por escenarios

#### 3.4.1 Crecimiento del parque automotor en función de la población

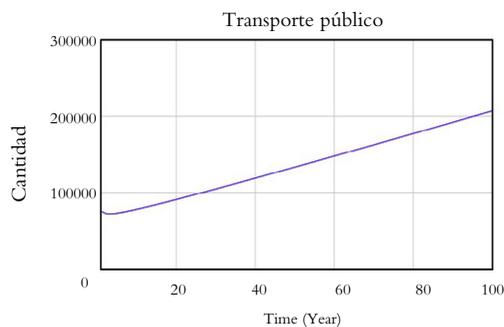
El crecimiento del parque automotor se relaciona directamente con el crecimiento poblacional. Como se ve en las figuras 2 a 8, el sector con mayor aumento serán los automóviles, camperos y camionetas y las motos, seguido por el transporte público, en el cual se espera una renovación de tecnología que tendrá como consecuencia la reducción de los buses colectivos zonales.



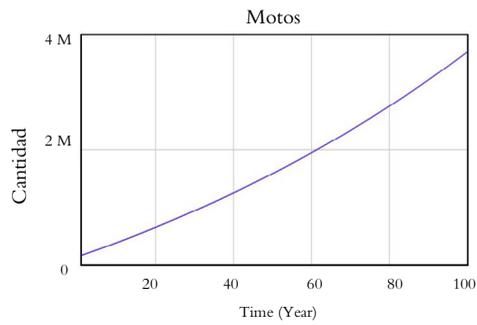
**Figura 2.** Proyección del crecimiento del parque automotor a cien años.  
Fuente: elaboración propia.



**Figura 3.** Proyección a cien años del crecimiento en el número de automóviles, camionetas y camperos.  
Fuente: elaboración propia.

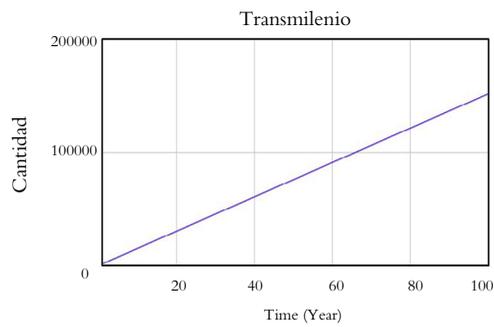


**Figura 4.** Proyección del crecimiento del transporte público a cien años.  
Fuente: elaboración propia.



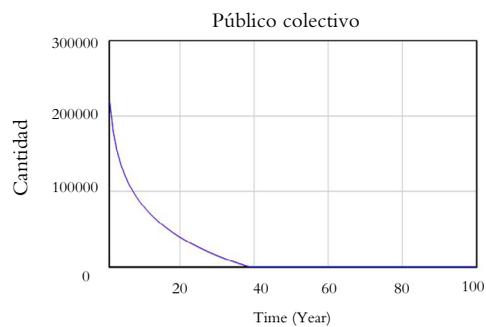
**Figura 5.** Proyección a cien años del crecimiento en el número de motos.

**Fuente:** elaboración propia.



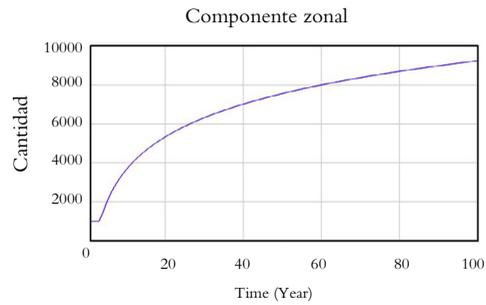
**Figura 6.** Proyección a cien años del crecimiento del número de buses de Transmilenio.

**Fuente:** elaboración propia.



**Figura 7.** Proyección a cien años del comportamiento del transporte público colectivo.

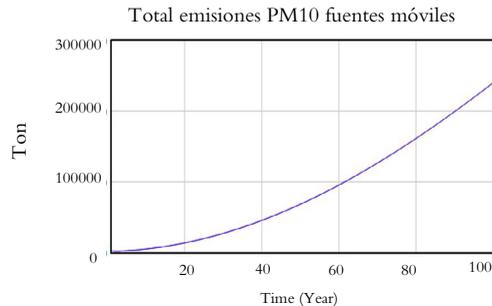
**Fuente:** elaboración propia.



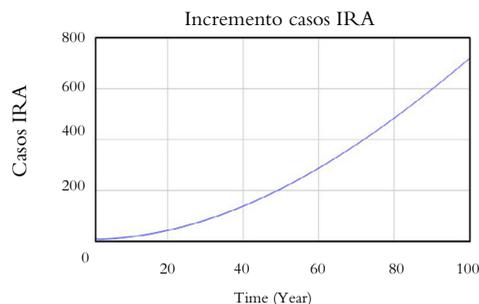
**Figura 8.** Proyección del crecimiento de componente zonal a cien años.  
Fuente: elaboración propia.

### 3.4.1.1 Escenario 1

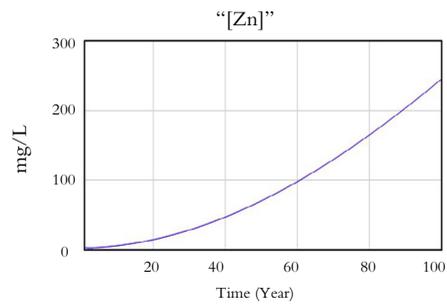
La modelación del primer escenario muestra un aumento sistemático de emisiones de PM10 por parte del parque automotor (figuras 9 a 14), el cual cada año será mayor si las tasas de crecimiento de los vehículos con combustibles convencionales aumentan más que el crecimiento de vehículos con motor eléctrico. Es decir, si la cantidad de vehículos con las mismas características investigadas del 2017 continúa aumentando, el sistema de transporte seguirá aportando significativas cantidades de PM10 en Bogotá, hasta llegar a un valor aproximado de 238 000 toneladas de PM10 en el año 2117 (figura 9), una cifra muy alarmante de cara al futuro.



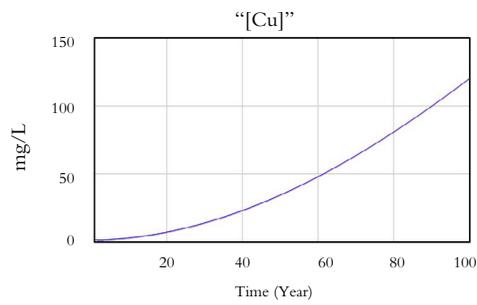
**Figura 9.** Proyección a cien años de emisiones de PM10 en el primer escenario.  
Fuente: elaboración propia.



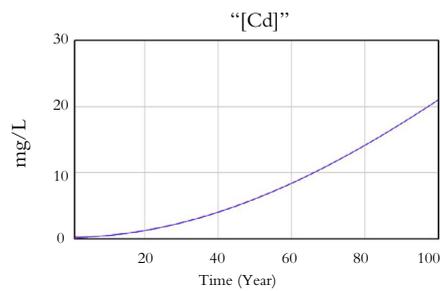
**Figura 10.** Proyección a cien años de los casos de IRA en el primer escenario.  
Fuente: elaboración propia.



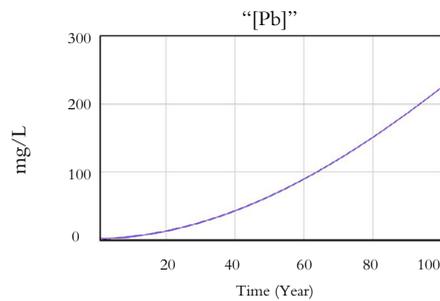
**Figura 11.** Proyección a cien años de la concentración de Zn en el primer escenario.  
**Fuente:** elaboración propia.



**Figura 12.** Proyección a cien años de la concentración de Cu en el primer escenario.  
**Fuente:** elaboración propia.



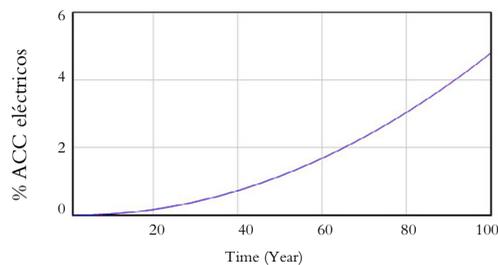
**Figura 13.** Proyección a cien años de la concentración de Cd en el primer escenario.  
**Fuente:** elaboración propia.



**Figura 14.** Proyección a cien años de la concentración de Pb en el primer escenario.  
**Fuente:** elaboración propia.

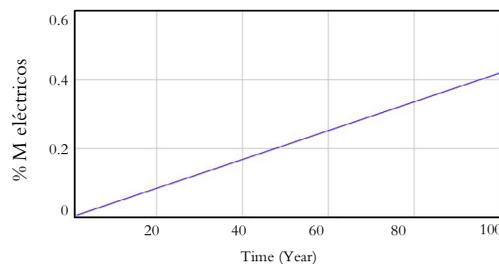
Así como aumentan los casos de IRA (figura 10) debido a la gran cantidad de PM10 emitido por el parque automotor, también se incrementa la concentración de los metales en la escorrentía urbana que se dirige al río Bogotá (figuras 11 a 14). Los valores más altos de metales pesados son los de Zn, aproximado de 240 mg/L (figura 11), seguido del Pb, con 220 mg/L (figura 14), Cu, con 125 mg/L (figura 12), y en menor cantidad el Cd, con 20 mg/L (figura 13). El valor del aumento en los casos de IRA es preocupante, pues de acuerdo con el modelo realizado, en cien años la tasa anual podrá ser de ochocientos por cada mil habitantes, es decir que el 80% de la población sufriría de esta enfermedad, la cual, si no es controlada, puede llegar a ser cancerígena.

Mediante la simulación se observa que la tasa de compra de vehículos eléctricos e híbridos en Colombia es muy baja (figuras 15 a 18), de hecho, llega a porcentajes realmente bajos en el período simulado. En el país, al inicio del año 2020 se han registrado 489 vehículos eléctricos y 376 híbridos en un parque de cinco millones de vehículos. Por otro lado, solo hay 1100 motos eléctricas de las siete millones registradas. Una de las razones por las cuales la adquisición de vehículos eléctricos e híbridos es muy baja en Colombia es que su costo no es competitivo frente a uno convencional de combustión fósil.



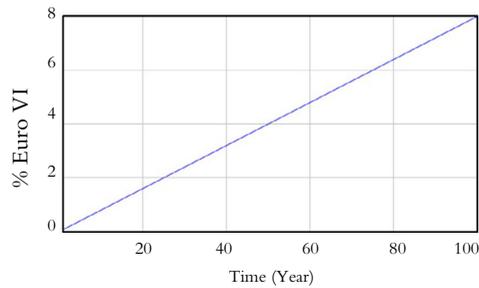
**Figura 15.** Proyección a cien años del %ACC eléctricos en el primer escenario.

**Fuente:** elaboración propia.

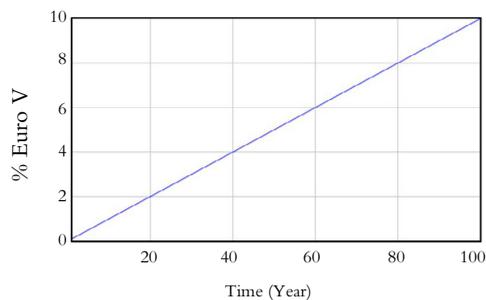


**Figura 16.** Proyección a cien años del %M eléctricas en el primer escenario.

**Fuente:** elaboración propia.



**Figura 17.** Proyección a cien años del % Euro VI en el escenario 1.  
Fuente: elaboración propia.



**Figura 18.** Proyección a cien años del % Euro V en el escenario 1.  
Fuente: elaboración propia.

### 3.4.1.2 Escenario 2

En el segundo escenario se aumentó la cantidad de vehículos y motos eléctricos en 100%, y de igual forma en el transporte público, lo cual significa que se llegaría a un valor máximo de aproximadamente 110 000 toneladas en el año 2055 (figura 19). Esto representa una disminución paulatina de emisión de PM10 del más del 50% con respecto al que se proyectaba para el 2117 en el primer escenario. Cuando la transición de uso de combustible fósil a motor eléctrico se haya realizado según lo planteado, la tasa anual de los casos de IRA atribuidos a la emisión de PM10 será de 83 por cada 1000 habitantes (figura 20); este pico ocurrirá en el año 2055 y luego los casos empezarán a disminuir. También es notoria la disminución de las concentraciones de metales pesados en la escorrentía, pues pasan de un nivel máximo esperado de 240 mg/L a 51 mg/L de Zn (figura 21). También habría una disminución en la concentración de metales pesados (figuras 22 a 24).

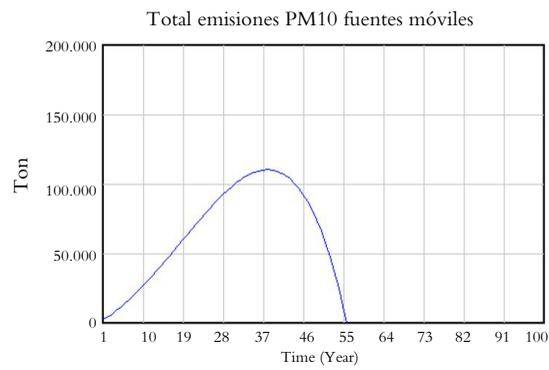


Figura 19. Proyección a cien años de las emisiones de PM10 en el segundo escenario.  
Fuente: elaboración propia.

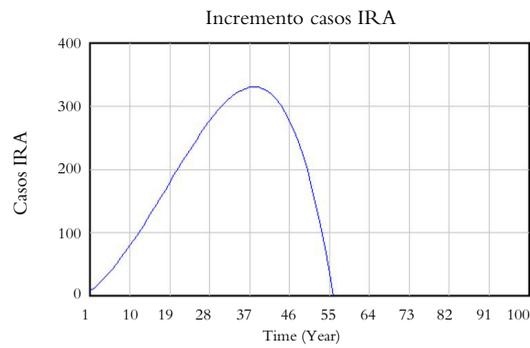


Figura 20. Proyección a cien años en los casos de IRA en el segundo escenario.  
Fuente: elaboración propia.

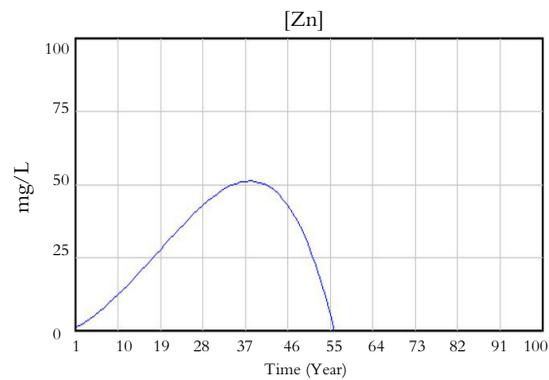
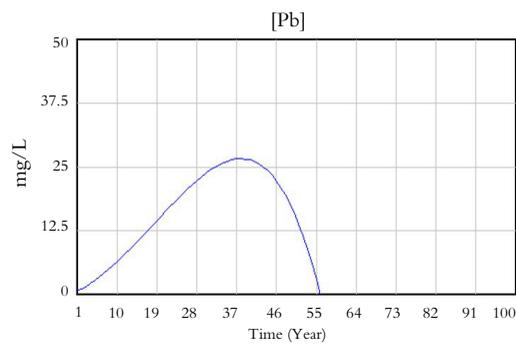
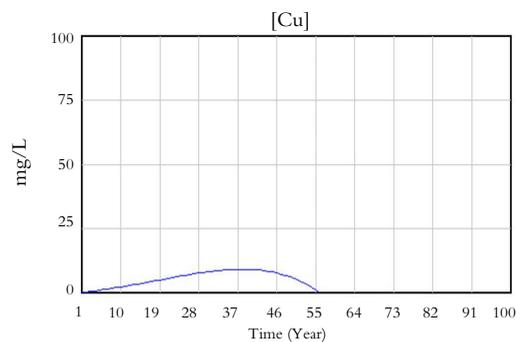


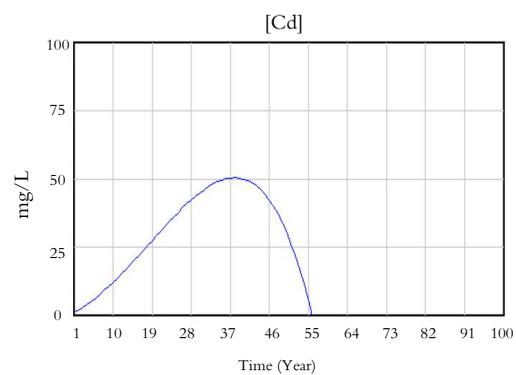
Figura 21. Proyección a cien años de las concentraciones de Zn en el segundo escenario.  
Fuente: elaboración propia.



**Figura 22.** Proyección a cien años de la concentración de Pb en el segundo escenario.  
Fuente: elaboración propia.



**Figura 23.** Proyección a cien años de la concentración de Cu en el segundo escenario.  
Fuente: elaboración propia.



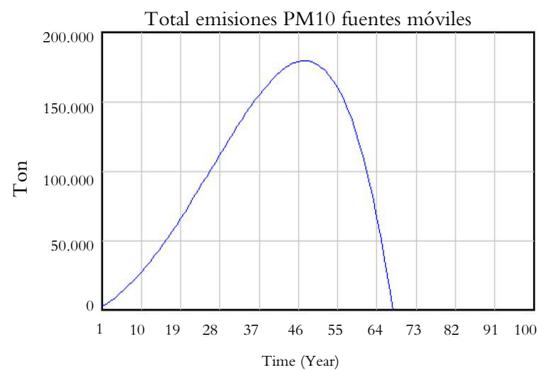
**Figura 24.** Proyección a cien años de la concentración de Cd en el segundo escenario.  
Fuente: elaboración propia.

Este segundo escenario es el que más se desea, pero el más difícil de lograr, puesto que requiere inversiones muy elevadas, de mayor interés social y de nuevas resoluciones y políticas para conseguir un sistema de transporte con esta tecnología. Esto se vería reflejado en un parque automotor más eficiente y sostenible que reduciría el costo en materia de salud pública ocasionado por las emisiones contaminantes y contribuiría a la competitividad del país.

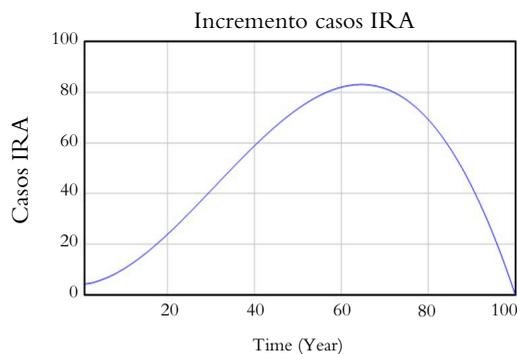
### 3.4.1.3 Escenario 3

El cambio en el parque automotor evaluado en el tercer escenario refleja una situación intermedia, con probabilidades de que se logre, en la cual se irán haciendo cambios progresivos en proporción de la flota eléctrica. El comportamiento del crecimiento del parque automotor eléctrico en el sector privado, a pesar de su impacto, no cuenta aún con suficiente apoyo de las entidades gubernamentales para que estos procesos de conversión a un sistema de movilidad cero emisiones sea posible, y es aquí donde representamos las demoras y brechas en el tiempo (figura 25).

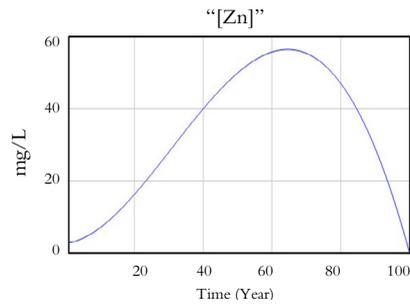
Así pues, este escenario contempla que existe un incremento al 50% de vehículos y motos eléctricas. Debido a estas condiciones, se espera que los casos de IRA disminuyan (figura 26) a una tasa anual mínimo de 331 por cada 1000 habitantes, lo cual representa el 8,3%. La concentración de metales pesados llegaría a valores máximos en el año 2081, aproximadamente de 57 mg/L de Zn (figura 27), 50 mg/L de Pb (figura 28), 28 mg/L de Cu (figura 29) y 4,7 mg/L de Cd (figura 30). Esta disminución se atribuye a que los vehículos con motores eléctricos no emiten PM10 y a que la tecnología Euro VI sí posee filtro, el cual reduce entre el 85% y el 99,9% las emisiones de material particulado de la flota reemplazada (Transmilenio, 2019).



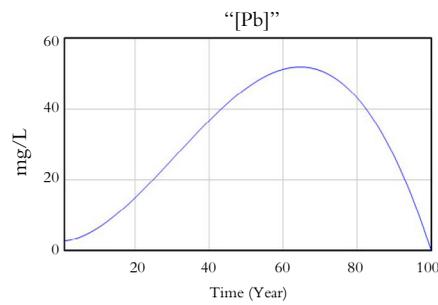
**Figura 25.** Proyección a cien años de las emisiones de PM10 en el tercer escenario.  
Fuente: elaboración propia.



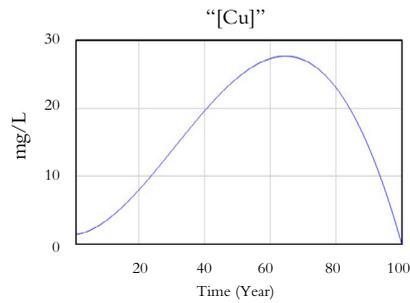
**Figura 26.** Proyección a cien años de los casos de IRA en el tercer escenario.  
Fuente: elaboración propia.



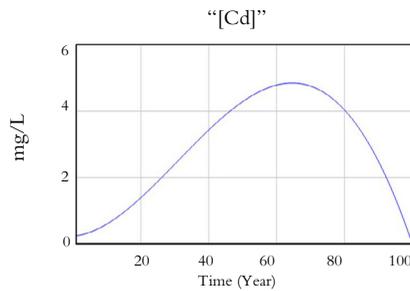
**Figura 27.** Proyección a cien años de la concentración de Zn en el tercer escenario.  
Fuente: elaboración propia.



**Figura 28.** Proyección a cien años de la concentración de Pb en el tercer escenario.  
Fuente: elaboración propia.



**Figura 29.** Proyección a cien años de la concentración de Cu en el tercer escenario.  
Fuente: elaboración propia.



**Figura 30.** Proyección a cien años de la concentración de Cd en el tercer escenario.  
Fuente: elaboración propia.

Para lograr este escenario, Colombia debe proponerse gravar todos los vehículos de más de cinco años, con mayores tasas para las unidades más viejas y motores más grandes, y así desincentivar el uso de vehículos más viejos y promover el de unidades más nuevas. Se propone usar mecanismos fiscales (exención del IVA) para fomentar la sustitución voluntaria de vehículos en todas las modalidades de transporte terrestre y segmentos (no solo de servicio público), siempre y cuando los vehículos que van a ingresar superen los estándares vigentes cuando se haya desintegrado un vehículo de manera voluntaria. Asimismo, los comercializadores de esta tecnología deben enfocarse en penetrar en primera instancia en el sector público, que hace mayor uso de las vías, y posteriormente en los consumidores del sector privado. Finalmente, es importante que el Estado amplíe y promueva beneficios para reducir el costo de las adquisiciones y establecer un arancel de 0% para cada unidad importada.

### 3.5 Matriz DOFA del escenario 3

A continuación, en la tabla 2 se presenta la matriz DOFA del tercer escenario.

Tabla 2. Matriz DOFA del escenario equilibrado (escenario 3)

Fortalezas	Oportunidades
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mayor eficiencia energética.</li> <li>• El vehículo no es contaminante.</li> <li>• Confort.</li> <li>• Mayor facilidad de aparcamiento.</li> <li>• Baja emisión de ruido.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Los recorridos diarios del vehículo eléctrico son compatibles con las autonomías actuales de las baterías.</li> <li>• Mejora de la imagen corporativa de la entidad o empresa de flotas (taxis).</li> <li>• Contribución a la mejora de la gestión de la red eléctrica.</li> <li>• Implantación de infraestructura de recarga en edificios.</li> <li>• Fomento del transporte público con el vehículo eléctrico.</li> <li>• Reducción de la dependencia de los combustibles fósiles.</li> <li>• Legislación más drástica para las emisiones de contaminantes asociados a la movilidad.</li> <li>• Existencia de incentivos económicos.</li> <li>• Existencia de alguna legislación específica para la implantación de estaciones privadas de recarga en edificios de uso residencial.</li> </ul>
Debilidades	Amenazas
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Falta de conocimientos de personal técnico acerca de los servicios relacionados con el vehículo eléctrico (reparación, recarga, etc.).</li> <li>• Necesidad de reducir los costos de las baterías.</li> <li>• Tiempo elevado de recarga.</li> <li>• Tiempo elevado de recarga.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Incremento del precio del litio si las reservas son limitadas y la demanda elevada.</li> <li>• Creciente eficiencia de los motores de combustión interna.</li> <li>• Dificultad en la homologación para una infraestructura de recarga pública y dificultades en el desarrollo de la infraestructura de recarga privada.</li> <li>• Dificultad en la homologación para una infraestructura de recarga pública y dificultades en el desarrollo de la infraestructura de recarga privada.</li> </ul>

Debilidades	Amenazas
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Incertidumbre en los precios de la electricidad.</li> <li>• Infraestructura de recarga pública de coste elevado.</li> <li>• Precio elevado del vehículo.</li> <li>• Escasa inclusión del vehículo eléctrico en flotas vehiculares.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Falta de visión del vehículo eléctrico como elemento energéticamente viable.</li> </ul>

Fuente: elaboración propia.

## 4. Conclusiones

Con el modelo de dinámica de sistemas desarrollado se realizaron los análisis del comportamiento temporal de niveles de contaminación por emisión de PM10 y los casos de IRA atribuidos a esta condición, lo cual permitió desarrollar hipótesis dinámicas mediante escenarios que explican las posibles causas del problema. A pesar de que el escenario ideal modelado fue el uso del 100% de vehículos eléctricos, es indecoroso debido a las altas inversiones que se tendrían que realizar por el costo de los automóviles eléctricos, al poco avance en la implementación de estaciones de recarga en puntos estratégicos para largos viajes y al porcentaje de colombianos que pueden acceder a esta alternativa. En consecuencia, es más conveniente que el nuevo modelo de transporte se base en las condiciones planteadas en el tercer escenario, y que se consideren fuentes combustibles, como producido por fermentación a partir de granos como el maíz o la caña de azúcar para reducir los gases de efecto invernadero.

Las emisiones de PM10, asociadas al crecimiento poblacional y al aumento del parque automotor, fomentan, alteran y provocan desequilibrio en el ambiente debido a que afectan directa e indirectamente la calidad del aire y la salud de los ciudadanos por IRA, así como indirectamente la calidad de las aguas superficiales como consecuencia del transporte de metales pesados en la escorrentía urbana. El modelo propuesto permite determinar que el metal pesado con mayor concentración en todos los escenarios es el zinc, seguido por el plomo y el cobre, y en menor concentración el cadmio.

Es importante que en Bogotá se aprueben políticas con beneficio, como que el arancel a vehículos eléctricos sea de 0% e híbridos 5% en el 2030, para garantizar una estabilidad jurídica de la política con el fin de incentivar el uso de tecnologías limpias. También se deben implementar programas para incrementar el número de vehículos eléctricos e híbridos en las flotas de servicio público en el perímetro urbano y rural. De igual forma, para que esta tecnología sea eficiente y sostenible, se deben desarrollar planes de implementación de estaciones de recarga, programas de disposición final de baterías de vehículos eléctricos, establecer tarifas diferenciales para carga de vehículos eléctricos, crear programas de capacitación a nivel nacional sobre cuidados de los vehículos eléctricos, promover foros y seminarios nacionales y regionales sobre movilidad sostenible, participar en el programa Proure y Eficiencia Energética, excluir del 1 x 1 (ingreso por reposición) vehículos eléctricos e híbridos y desarrollar CONPES para movilidad sostenible.

## Referencias

- Bilash, B. K., Fatimah, M. A., & Mohd, K. M. (2017). *System dynamics: Modelling and simulation*. Springer.
- Clean Air Institute. (2013). *La calidad del aire en América Latina: Una visión panorámica*. <https://bit.ly/2N3t6Ae>
- Cifuentes, L., Krupnick, A. J., O’Ryan, R., & Toman, M. A. (2005). *Urban air quality and human health in Latin America and the Caribbean*. Organización Panamericana de la Salud. <https://bit.ly/3nu6KYe>
- Fletcher, T. D., Andrieu, H., & Hamel, P. (2013). Understanding, management and modelling of urban hydrology and its consequences for receiving waters: A state of the art. *Advances in Water Resources*, 51, 261-279. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2012.09.001>
- Gaitán, M., Cancino, J., & Beherentz, E. (2007). Análisis del estado de la calidad del aire en Bogotá. *Revista de Ingeniería*, 26, 81-92. <http://www.scielo.org.co/pdf/ring/n26/n26a11.pdf>
- Gromaire-Mertz, M. C., Garnaud, S., Gonzalez, A., & Chebbo, G. (1999). Characterisation of urban runoff pollution in Paris. *Water Science and Technology*, 39(2), 1-8. [https://doi.org/10.1016/S0273-1223\(99\)00002-5](https://doi.org/10.1016/S0273-1223(99)00002-5)
- Harremoës, P. (1997). Integrated water and waste management. *Water Science and Technology*, 35(9), 11-20. <https://doi.org/10.2166/wst.1997.0327>
- Hvitved-Jacobsen, T., Vollertsen, J., & Haaning Nielsen, A. (2010). *Urban and highway stormwater pollution: Concepts and engineering*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781439826867>
- Kim, L.-H., Kayhanian, M., Zoh, K.-D., & Stenstrom, M. K. (2005). Modeling of highway stormwater runoff. *Science of The Total Environment*, 348(1-3), 1-18. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2004.12.063>
- Leal, Y., & Castiblanco, E. (2020). La contaminación atmosférica en el municipio de San José de Cúcuta – Colombia. *Saber, Ciencia y Libertad*, 15(1), 176-191. <https://doi.org/10.18041/2382-3240/saber.2020v15n1.6309>
- Lee, S., Suits, M., Wituszynski, D., Winston, R., Martin, J., & Lee, J. (2020). Residential urban stormwater runoff: A comprehensive profile of microbiome and antibiotic resistance. *Science of The Total Environment*, 723, Article 138033. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138033>
- Organización Mundial de la Salud [OMS]. (2016, septiembre 27). La OMS publica estimaciones nacionales sobre la exposición a la contaminación del aire y sus repercusiones para la salud. <https://bit.ly/3bJEgXz>
- Secretaría Distrital de Movilidad. (2017). Observatorio de movilidad. <https://bit.ly/3NFLRDU>
- Torres, C. S. (2010). *Línea de Calidad de Aire y Salud*. [https://oab.ambientebogota.gov.co/?post\\_type=dml\\_download&p=4104](https://oab.ambientebogota.gov.co/?post_type=dml_download&p=4104)
- Transmilenio. (2019, julio 1). Empiezan a rodar los primeros 140 buses de Transmilenio a gas natural en Bogotá. <https://bit.ly/3la7nzz>

Walsh, C. J., & Kunapo, J. (2009). The importance of upland flow paths in determining urban effects on stream ecosystems. *Journal of the North American Benthological Society*, 28(4), 977-990. <https://doi.org/10.1899/08-161.1>

Zhang, Z., Cui, B., & Fan, X. (2012). Removal mechanisms of heavy metal pollution from urban runoff in wetlands. *Frontiers of Earth Science*, 6(4), 433-444.

# Evaluación de amenazas naturales asociadas al área de influencia de la bocatoma del municipio de Ubaté, Cundinamarca

Assessment of natural threats associated with the area of influence of the mouth of the municipality of Ubaté, Cundinamarca

Ana Silvia Duarte López<sup>\*</sup>, Lilia Juliana Marroquín Ojeda<sup>\*\*</sup> y Maritza Páez Silva<sup>\*\*\*</sup>

---

---

## Cómo citar:

Duarte López, A. S., Marroquín Ojeda, L. J., & Páez Silva, M. (2020). Evaluación de amenazas naturales asociadas al área de influencia de la bocatoma del municipio de Ubaté, Cundinamarca. *Ingeciencia*, 5, 81-94.

- \* Ingeniera ambiental de la Universidad Central. Correo: aduarte1@ucentral.edu.co
- \*\* Ingeniera ambiental de la Universidad Central. Correo: lmarroquino1@ucentral.edu.co
- \*\*\* Ingeniera ambiental de la Universidad Central. Forma parte del Grupo de Investigación Agua y Desarrollo Sostenible de la misma universidad. Correo: mpaezs2@ucentral.edu.co

## Resumen

En los sistemas de abastecimiento de agua potable, la ocurrencia de fenómenos naturales puede afectar gravemente la bocatoma, ocasionar interrupciones en el suministro y, por lo tanto, afectar a la población abastecida. Esta investigación evalúa el grado de amenaza por fenómenos naturales que tiene la bocatoma del acueducto del municipio de Ubaté, Cundinamarca. En la primera fase se diagnosticó el área de influencia de la bocatoma empleando información secundaria, visitas de campo y una entrevista al encargado de servicios públicos. En la segunda fase se identificaron las amenazas aplicando modelos espaciales, seleccionados mediante una revisión bibliográfica sistemática, y se ponderaron las variables incluidas en cada amenaza. En la tercera fase, los mapas resultantes se categorizaron y evaluaron en amenaza baja, media y alta para cada fenómeno analizado. Los resultados muestran que el 12% del área de influencia presenta una amenaza alta por remoción en masa, el 15% es altamente susceptible a incendios forestales, el 34% tiene una amenaza alta por el fenómeno de inundación y el 33%, por fenómenos de erosión.

**Palabras clave:** amenazas naturales, bocatoma, modelos espaciales, Ubaté.

## Abstract

In drinking water supply systems, the occurrence of natural phenomena can seriously affect the intake, cause interruptions in the supply and, therefore, affect the supplied population. This research evaluates the degree of threat due to natural phenomena that the intake of the aqueduct of the municipality of Ubaté, Cundinamarca, has. In the first phase, the area of influence of the intake was diagnosed using secondary information, field visits and an interview with the person in charge of public services. In the second phase, the threats were identified by applying spatial models, which were selected from a systematic bibliographic review, and the variables included in each threat were weighted. In the third phase, the resulting maps were categorized and evaluated as low, medium and high threat for each phenomenon analyzed. The results show that in the area of influence, 12% present a high threat due to mass removal, 15% highly susceptible to forest fire events, 34% demonstrate a high threat to the phenomenon of flooding and 33% have a high threat due to erosion phenomena.

**Keywords:** intake, natural hazards, spatial models, Ubaté.

## 1. Introducción

En Colombia, la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres (UNGRD) es la entidad encargada de reducir el riesgo de desastres y de las pérdidas ocasionadas tanto en vidas, medios de subsistencia y salud, como en bienes físicos, sociales, culturales y ambientales de las personas, las empresas, las comunidades y los países. Según esta dependencia (UNGRD, 2014), durante el período 2006-2014 se registraron 3181 muertos y 12,3 billones de afectados por fenómenos naturales en el país. Asimismo, en cuanto al nivel de exposición en el territorio nacional, el 36% se encuentra en situación de amenaza sísmica alta, el 28% en alto potencial de inundación y el 8% en amenaza alta por movimientos en masa.

Para el sector de agua potable y saneamiento básico, conocer el nivel de riesgo al que están expuestos los sistemas de prestación es el soporte para diseñar e implementar medidas de reducción (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio & UNGRD, 2014). Entre los fenómenos que pueden representar amenazas para este sector se encuentran los de origen natural, los socio-naturales y los antrópicos (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio & UNGRD, 2014). Los daños ocasionados por fenómenos naturales en los sistemas de acueducto y alcantarillado muestran una tendencia creciente. De estos, uno de los más representativo ha sido el fenómeno de El Niño que ocurrió de 2009 a 2010, el cual generó racionamiento y desabastecimiento de agua en por lo menos 130 municipios del país (11,6%). En materia de pérdidas y costos de reconstrucción de sistemas de acueductos y saneamiento básico, los recursos destinados están cerca de los \$514 millones, de un total de \$9,3 billones del Fondo de Recursos de Adaptación (Ministerio de Hacienda, 2014).

En el ámbito internacional, el interés por la identificación del riesgo abarca no solamente el concepto de *amenaza*, sino también el de *vulnerabilidad*. En América del Sur, se registran varios estudios, como la geomorfología aplicada a la evaluación de amenazas de origen natural en Chile (Ibarra *et al.*, 2016), la vulnerabilidad educativa ante incendios forestales (Jaque *et al.*, 2019), la identificación de áreas susceptibles por deslizamientos en el Catón Mira, Ecuador (Patiño, 2019), y la identificación de amenazas en áreas de recarga hídrica en la provincia de Cotopaxi, Ecuador (Guzmán, 2019). En la zona central del continente, se han implementado metodologías para elaborar mapas de susceptibilidad en Chiapas (Paz *et al.*, 2017).

En Colombia se han realizado estudios en diferentes municipios, tales como: zonificación del riesgo por deslizamientos en el municipio de Pensilvania, Caldas (Cárdenas, 2019); determinación de posibles zonas en amenaza por inundación en el municipio de Mompox, Bolívar (Ruiz & Salazar, 2017); evaluación de la amenaza por movimientos en masa en el casco urbano del municipio de Tenza, Boyacá (Fajardo, 2019), entre otros. La mayoría de estos trabajos se enfocan en el procesamiento digital de imágenes satelitales y el uso de sistemas de información geográfica (SIG). En el período de análisis (1994-2016), estas investigaciones abordaron, sobre todo, fenómenos de remoción en masa, inundaciones, incendios forestales y deforestación (DesInventar, 2016).

Específicamente, la captación del acueducto del municipio de Ubaté, Cundinamarca, compuesta por una bocatoma de fondo, se encuentra ubicada al margen del río Ubaté en la vereda Sucunchoque. Si bien se han realizado algunos estudios, como el diagnóstico del acueducto (Consorcio SES-ARQ, 2012) e informes hidráulicos e hidrológicos, no se han hecho investigaciones que permitan identificar y evaluar las amenazas naturales en el área de influencia de la bocatoma del municipio de Ubaté, objetivo general de este trabajo.

## 2. Materiales y métodos

La evaluación de las amenazas en el área de influencia de la bocatoma del acueducto de Ubaté se desarrolló en tres fases, que se describen a continuación.

### 2.1 Fase 1: diagnóstico

El diagnóstico se elaboró a partir de información sobre el medio físico (geología, geomorfología, relieve, precipitación y temperatura), biofísico (cobertura vegetal) y socioeconómico (uso actual de la tierra). Con este objetivo se consultaron los estudios del Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca (Pomca) del río Ubaté (Corporación Autónoma Regional [CAR], 2005), así como el informe plan maestro de acueducto del municipio de Ubaté (Consortio SES-ARQ, 2012). La información análoga y cartográfica utilizada en el estudio fue la siguiente:

- Geología de la plancha 209 Zipaquirá, escala 1:100 000, Servicio Geológico Colombiano.
- *Shapefile* de geomorfología de 2018, escala 1:25 000, Instituto Geográfico Agustín Codazzi.
- *Shapefile* de curvas de nivel de la Cartografía Base a escala 1:25 000, Datos abiertos Cartografía y Geografía, Instituto Geográfico Agustín Codazzi.
- Precipitación total anual de 1961 a 2017, estaciones CAR Campamento Ubaté, La Boyera, Carmen de Carupa, Tapias, Isla del Santuario y Sutatausa.
- Temperatura promedio mensual de 1981 a 2018, Isla del Santuario, Sutatausa, Novilleros, Carupa y Carrizal, estaciones CAR e Ideam.
- Imagen de satélite Sentinel de 2018, Copernicus.
- *Shapefile* de uso actual de la tierra escala 1:100 000, Instituto Geográfico Agustín Codazzi.

Se realizaron visitas de campo al área de influencia de la bocatoma para determinar y georreferenciar las especies vegetales presentes, identificar las posibles amenazas por los fenómenos naturales y el desarrollo de actividades antrópicas. Para precisar la vegetación de la zona, se realizó un proceso de teledetección ambiental utilizando el método de clasificación supervisada con el *software* ArcGis 10.7. Finalmente, el estudio se apoyó con la entrevista a la empresa de servicios públicos del municipio Emservilla S. A.

### 2.2 Fase 2: determinación de amenazas

Las amenazas que se analizaron fueron remoción en masa, inundaciones, incendios forestales y erosión, para lo cual se consultó el reporte de DesInventar1 sobre la ocurrencia de estos fenómenos, excepto para erosión. Asimismo, se hizo una revisión bibliográfica en bases de datos del período 2013–2021 sobre metodologías espaciales para determinar estas amenazas y elegir un método para cada una que fuera adecuado a las condiciones del área de estudio.

---

1 Base de datos creada por la corporación OSSO (Observatorio Sismológico del Suroccidente Colombiano) que permite ver los desastres desde una escala espacial local (municipio), al integrar la gestión del riesgo entre actores e instituciones, sectores y gobiernos provinciales y nacionales.

Cada mapa es producto del análisis espacial y de la suma ponderada de las variables que los comprenden, previamente clasificadas en relación con la susceptibilidad a la amenaza, en alta, media o baja; la ponderación se obtuvo por medio de la consulta a expertos, quienes realizaron una calificación cuantitativa y cualitativa.

### 2.3 Fase 3: evaluación de la amenaza

Para evaluar la amenaza, y de acuerdo con el resultado de las variables, cada mapa fue categorizado en amenaza baja, media y alta. Debido a que existen diferencias entre la categorización de las variables, fue necesario estandarizarlas con el criterio de normalización propuesto por Malczewski (como se citó en Gómez & Barredo, 2006).

Los modelos elegidos y el mapa resultante para cada amenaza se presentan en las figuras 1 a 4, en cuya ecuación se incluye la ponderación de cada variable. Con el fin de validar los modelos, en cada mapa se incluye el histórico de los eventos ocurridos en el área de estudio, tomados a partir de la información de DesInventar.

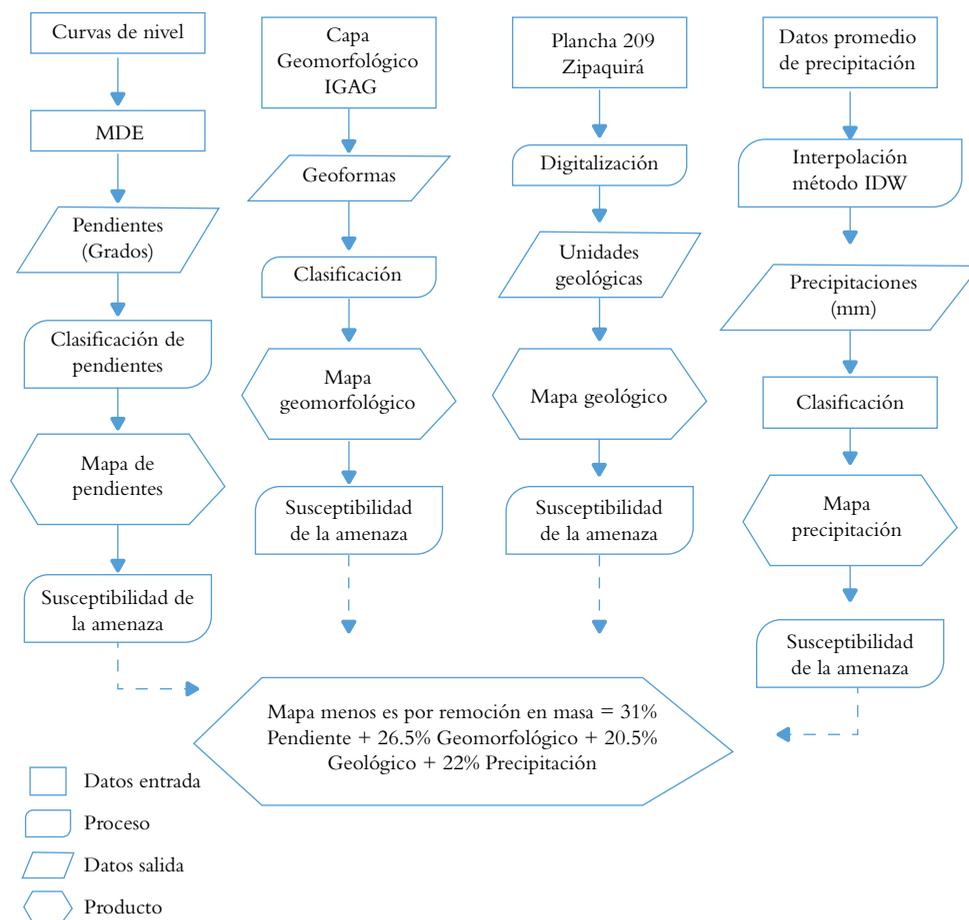
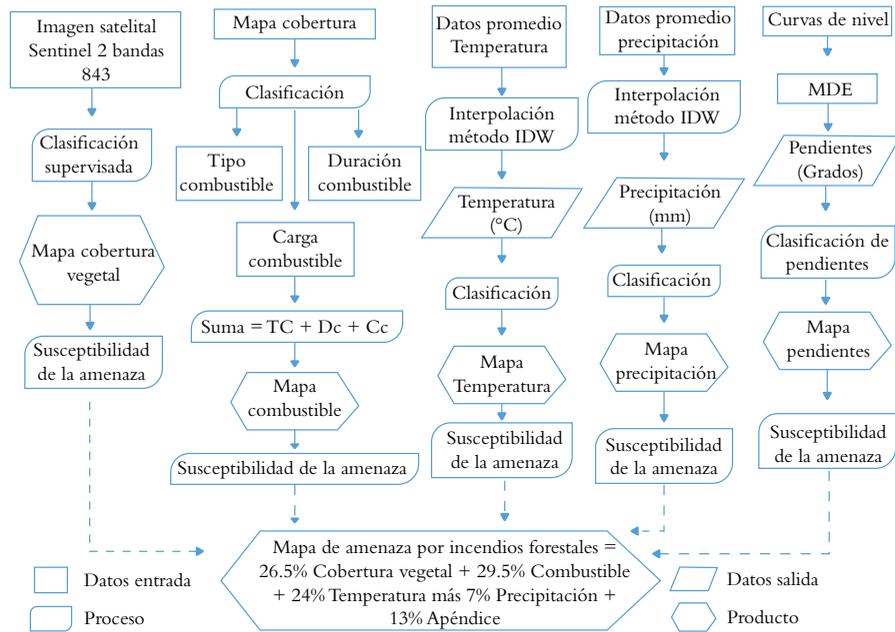
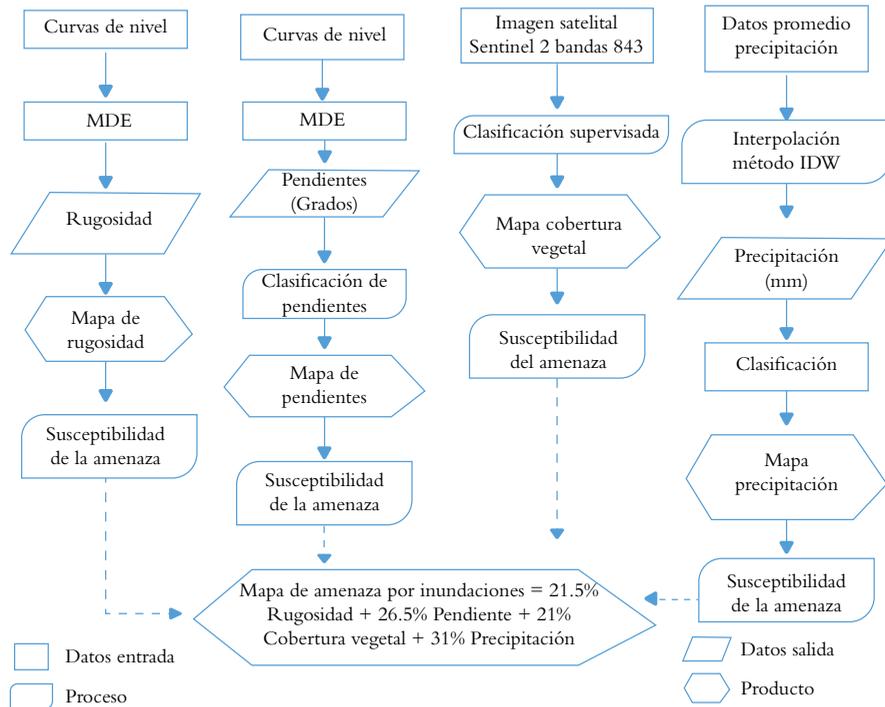


Figura 1. Modelo de amenaza por remoción en masa.

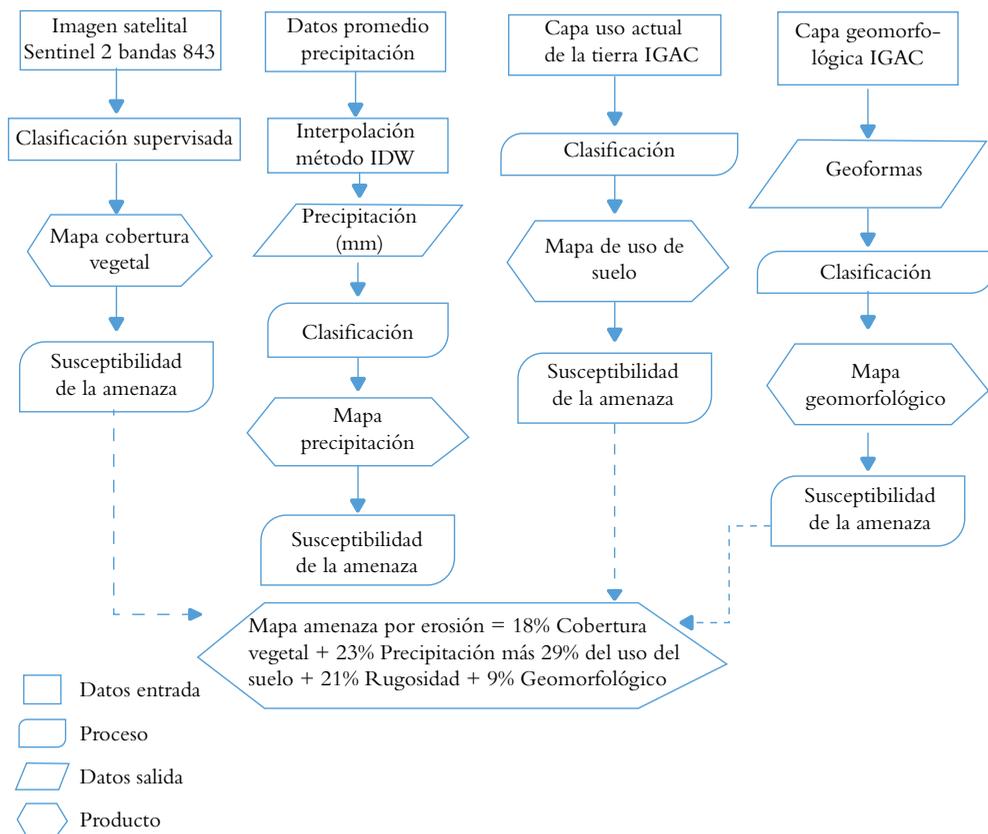
Fuente: Cárdenas (2019).



**Figura 2.** Modelo de amenaza por incendios forestales.  
 Fuente: Ideam (2011).



**Figura 3.** Modelo de amenaza por inundaciones.  
 Fuente: adaptado de Corporación Autónoma Regional de las Cuencas de los Ríos Negro y Nare (Cornare) y Gobernación de Antioquia (2012).



**Figura 4.** Modelo de amenaza por erosión.  
**Fuente:** adaptado de Pérez (2001).

### 3. Resultados y discusión

La categorización de las amenazas por fenómeno se describe en las figuras 5 a 8. El análisis para la categoría de amenaza alta se hace posteriormente.

### 3.1 Amenaza por remoción en masa

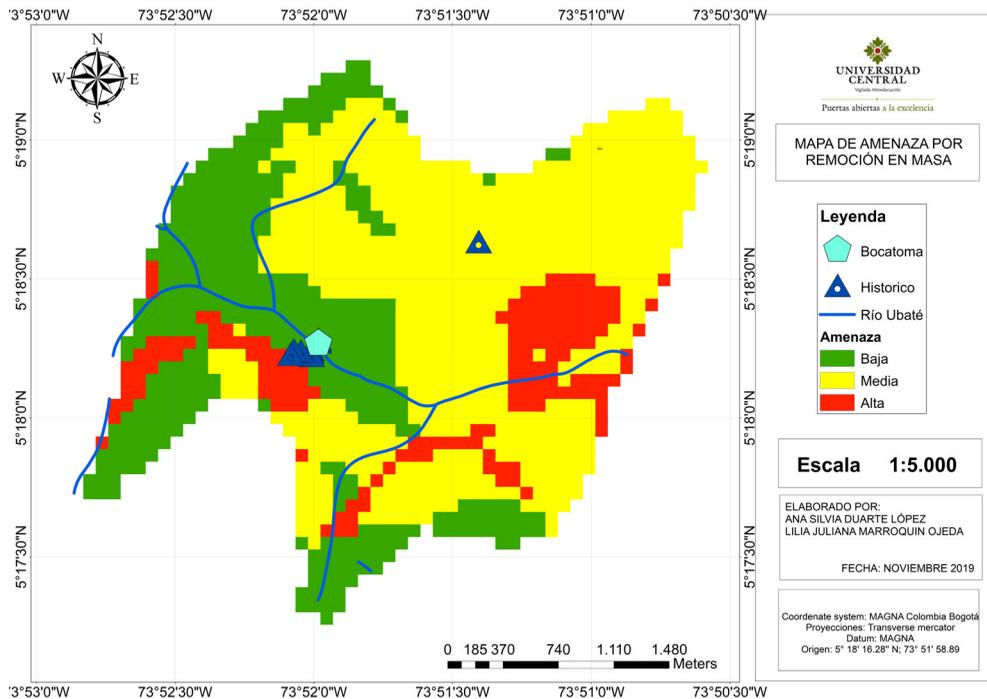


Figura 5. Mapa de amenaza por remoción en masa.

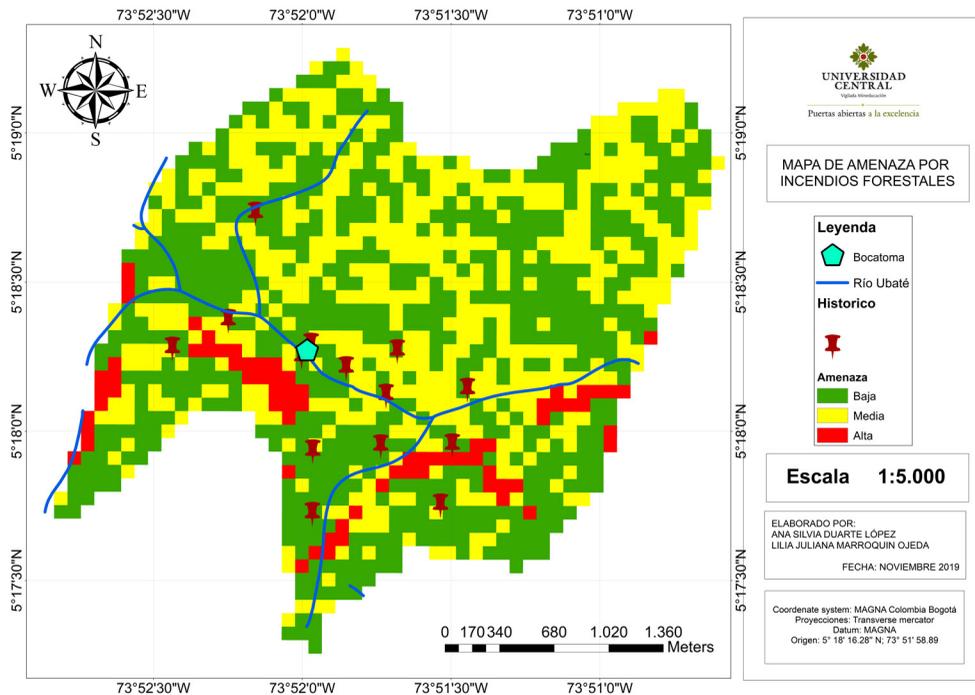
Fuente: elaboración propia.

Los resultados muestran que el 12% del área se encuentra en amenaza alta por remoción en masa, la cual obedece a que la zona montañosa tiene pendientes superiores al 40%. El área tiene presencia de lodolitas gris oscuro con intercalaciones delgadas de cuarzoarenitas de textura fina, materiales susceptibles a deslizamientos que tienden a desintegrarse después de varios ciclos de secado y humedecimiento, lo cual concierne con la precipitación media anual (entre 700 mm y 785 mm) y que se evidencia por los desprendimientos de roca ante la ausencia de vegetación.

El estudio de Patiño (2019) muestra que la susceptibilidad a deslizamientos se encuentra en un terreno ligeramente ondulado con un grado de pendiente de 5° a 15° que está extendido a lo largo del territorio; la amenaza alta representa el 9% del territorio, y para determinar la susceptibilidad se tuvo en cuenta la cercanía de asentamientos poblacionales o vías de tránsito; adicionalmente, el análisis multicriterio muestra coincidencia, debido a que se le da mayor valoración a la precipitación, por ser un factor detonante dependiendo de la cantidad de lluvia que cae en un tiempo determinado.

Al respecto, en el estudio propuesto por Cárdenas (2019) se encuentra similitud en el grado de pendientes que oscilan entre los 19° y los 40°, de manera que los dos centros poblados mencionados se encuentran cerca de la zona de amenaza alta para deslizamientos. Finalmente, el análisis multicriterio evidencia que la mayor valoración es la de pendientes, seguida por la precipitación.

### 3.2 Amenaza por incendios forestales

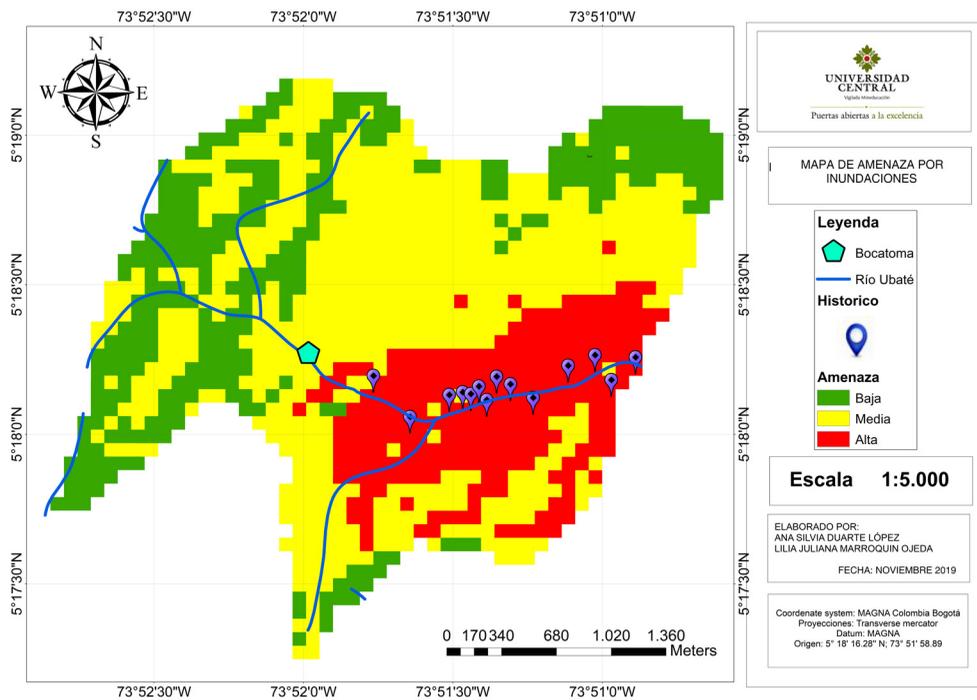


**Figura 6.** Mapa de amenaza por incendios forestales.  
Fuente: elaboración propia.

El 15% del área presenta amenaza alta por incendios forestales. En alta montaña, la vegetación alberga especies como ciro, ocal, hayuelos y fique, así como una plantación forestal de eucalipto y acacia, las cuales propagan el fuego y son susceptibles a desaparecer ante estos fenómenos.

Al respecto, en un estudio realizado en la comuna de Penco (Chile), Jaque *et al.* (2019) identificaron una interfaz urbana-forestal en la que el riesgo de amenaza alta por causas intencionales es del 40% en los lugares habitados, de acuerdo con la encuesta que realizaron a la población. Esto indica que este tipo de fenómeno no se da de manera natural, sino que es una afectación antrópica.

### 3.3 Amenaza por inundaciones



**Figura 7.** Mapa de amenaza por inundaciones.  
Fuente: elaboración propia.

La amenaza alta por inundaciones es del 34% y se presenta en zonas de pendientes bajas, alta presencia de suelos desnudos, pasto nativo y ocal. Normalmente, la zona presenta precipitaciones altas, que se incrementan en la temporada de invierno, lo cual ocasiona crecientes e inundaciones. El cauce del río Ubaté discurre por una franja encañonada, de altas pendientes y de áreas transversales muy angostas, lo cual facilita el desbordamiento del río en períodos de altas precipitaciones.

Respecto a este riesgo, si bien en el estudio de caso que realizaron Ruiz y Salazar (2017) se encuentran escasos datos históricos, los investigadores determinaron una susceptibilidad a inundaciones del 86%. Con base en esta información, clasificaron la amenaza como media, debido a que las coberturas del suelo corresponden en gran proporción a lagos y lagunas. En la presente investigación se contó con un reporte de catorce datos históricos ubicados en la zona de amenaza alta, lo cual significa que el modelo utilizado puede ser replicado en lugares similares debido a la alta correspondencia de la ocurrencia de eventos.

### 3.4 Amenaza por erosión

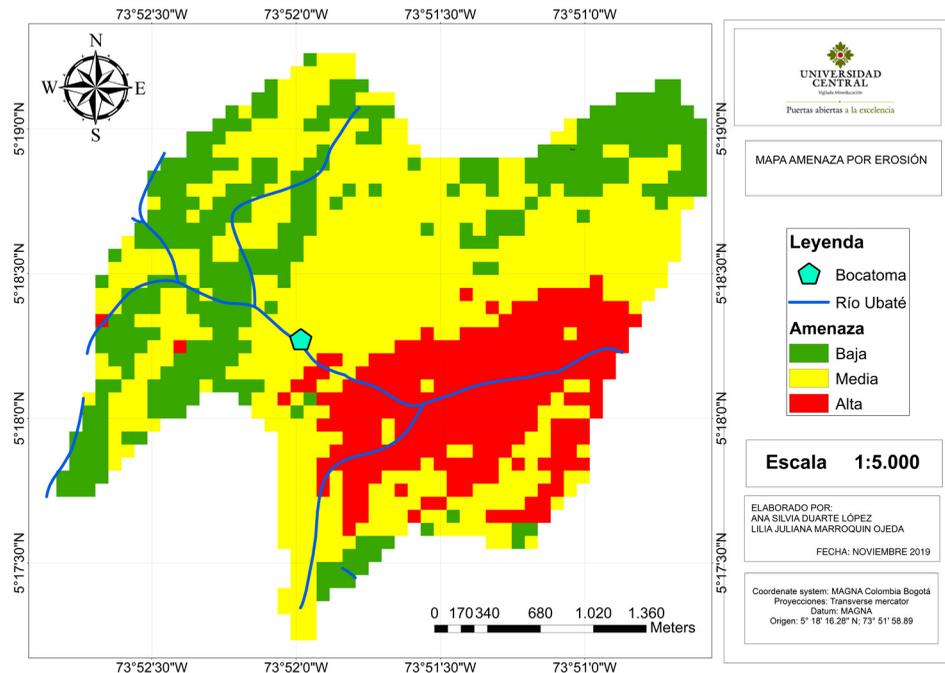


Figura 8. Mapa de amenaza por erosión.

Fuente: elaboración propia.

El nivel de amenaza alta por erosión equivale al 33% de la zona estudiada. En general, se identifica montaña estructural, lo cual hace que se produzca con mayor facilidad el desprendimiento vegetal que causa la erosión. Además, se debe tener en cuenta que, cuando se presentan condiciones de sequía, el ocal elimina la vegetación circundante porque absorbe el agua disponible con sus raíces. De otra parte, en cuanto a la degradación del suelo que se identifica en la orilla del río, se puede afirmar que es producida por la actividad agrícola y ganadera. Finalmente, se encuentra que los suelos desprotegidos presentan erosión hídrica debido a que las gotas de lluvia caen directamente y generan grietas, lo cual se evidenció durante las visitas en las rocas dispuestas en los taludes periféricos a la bocatoma.

## 4. Conclusiones

El área de estudio presenta pendientes con inclinación mayor de 40° y predominan montañas estructurales que varían entre los 2600 ms.n.m. y los 3000 ms.n.m. La presencia de lodolitas, rocas que contienen cantidades importantes de arcilla —denominadas genéricamente como lutitas—, hace que los terrenos sean propensos a fenómenos de erosión y remoción en masa. Se presentan fenómenos como inestabilidad geotécnica, erosión constante, reptación, fragmentación del suelo en áreas sin presencia de vegetación y carcavamiento debido a la infiltración de agua. Predomina la vegetación nativa de alta montaña con especies de diferentes características, algunas de las cuales promueven la erosión hídrica debido a su absorbancia y otras propagan fácilmente el fuego por su duración como combustible.

El 12% del área presenta una amenaza alta por remoción en masa, la cual se localiza en la periferia oriental debido a los taludes aferentes al sistema de captación, con pendientes superiores a los 40°. Además, el 15% de la zona es altamente susceptible a eventos de incendios forestales, ubicada en la parte alta de las zonas montañosas, debido a que la mayoría de las especies de cobertura vegetal que alberga propagan fácilmente el fuego. En cuanto al fenómeno de inundación, el 34% del área presenta amenaza alta en las zonas de bajas pendientes. En este sentido, se debe tener en cuenta que el cauce del río Ubaté discurre por una franja encañonada, de altas pendientes y de áreas transversales muy angostas, lo cual facilita el desbordamiento del río en períodos de altas precipitaciones. Asimismo, se encontró que el 33% de la zona tiene amenaza alta por fenómenos de erosión, lo cual es resultado de la destrucción de las coberturas vegetales en las partes altas de la cuenca debido a las prácticas inapropiadas de ganadería extensiva y agricultura. Esto, a su vez, genera suelos degradados que, en combinación con la pendiente, favorecen las variables erosivas.

Finalmente, se concluye que los modelos de evaluación de amenazas por remoción en masa e inundaciones seleccionados son replicables en lugares similares al área estudio, debido a que los resultados de amenaza alta son correspondiente con la ocurrencia de eventos en la zona.

## Agradecimientos

A la directora de trabajo de grado, Maritza Páez Silva, por su dedicación, exigencia, profesionalismo, compromiso y apoyo en la culminación de la investigación. A la Universidad Central, por guiar el proceso de aprendizaje. A la empresa Emservilla, S. A., por el acompañamiento y el acceso a la información.

## Referencias

- Cárdenas, R. (2019). *Zonificación del riesgo por deslizamientos e inundaciones en el municipio de Pensilvania, Caldas (Colombia)* [Tesis de maestría, Universidad de Salzburg]. [https://issuu.com/unigis\\_latina/docs/cardenas\\_ronald\\_2015b](https://issuu.com/unigis_latina/docs/cardenas_ronald_2015b)
- Consortio SES-ARQ. (2012). *Informe diagnóstico: Ajuste, actualización, terminación o formulación de planes maestros de los sistemas de acueducto y alcantarillado en zonas urbanas y centros nucleados del departamento de Cundinamarca: Formulación plan maestro de acueducto municipio de Ubaté departamento de Cundinamarca.*
- Corporación Autónoma Regional [CAR]. (2005). *Plan de ordenamiento de la cuenca de los ríos Ubaté y Suárez: Diagnóstico general.* CAR. <https://www.car.gov.co/uploads/files/5ac693c13ebab.pdf>
- Corporación Autónoma Regional de las Cuencas de los Ríos Negro y Nare [Cornare] & Gobernación de Antioquia. (2012). *Evaluación y zonificación de riesgos por avenida torrencial, inundación y movimiento en masa y dimensionamiento de procesos erosivos en el municipio de La Ceja.* Divergráficas. <https://www.cornare.gov.co/GestionRiesgo/LA-CEJA/INFORME-FINAL-LA-CEJA.pdf>

- DesInventar. (2016). Sistema de Inventario de Desastres. Corporación OSSO – Colombia. <https://db.desinventar.org/DesInventar/main.jsp>
- Fajardo, O. E. (2019). *Evaluación de la amenaza por movimientos en masa en el casco urbano del municipio de Tenza, departamento de Boyacá* [Tesis de especialización, Universidad Católica de Manizales]. Repositorio UCM. <https://repositorio.ucm.edu.co/handle/10839/2628>
- Gómez, M., & Barredo, J. (2006). *Sistemas de Información Geográfica y evaluación multicriterio en la ordenación del territorio* (2.ª ed.). Grupo Editorial RA-MA.
- Guzmán Agualongo, W. A. (2019). *Identificación de las amenazas en las áreas de recarga hídrica de mayor importancia en el piso bioclimático BsBn04 en la parroquia el Tingo Cantón Pujilí, Provincia de Cotopaxi, 2018* [Tesis de pregrado, Universidad Técnica de Cotopaxi]. Repositorio UTC. <http://repositorio.utc.edu.ec/handle/27000/5898>
- Ibarra Cofré, I., Castro Correa, C. P., Soto, M.-V., & Rauld, R. (2016). Geomorfología aplicada a la evaluación de amenazas de origen natural en la zona sur de la columna de Pichilemu, Región de O'Higgins, Chile. *Investigaciones Geográficas Chile*, 51, 61-80. <https://doi.org/10.5354/0719-5370.2016.42521>
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [Ideam]. (2011). *Protocolo para la realización de mapas de zonificación de riesgos a incendios de la cobertura vegetal - Escala 1:100.000*. Ideam. <https://bit.ly/2F660Tg>
- Jaque Castillo, E., Castillo, C., Ojeda Leal, C., & Díaz, P. (2019). Vulnerabilidad educativa ante incendios forestales en el Área Metropolitana de Concepción. Caso de estudio: Penco, Chile. *Estudios Socioterritoriales*, 25, Artículo e022. <https://doi.org/10.37838/unicen/est.25-022>
- Ministerio de Hacienda. (2014). *Fondo Adaptación – Plan De Acción 2014: Planeación y gestión del Fondo Adaptación bajo un enfoque de rendimiento institucional*. Fondo de Adaptación; Ministerio de Hacienda. <https://bit.ly/3aj2KXA>
- Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, & Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres [UNGRD]. (2014). *Herramienta metodológica para la formulación de programas de gestión del riesgo de desastres en los servicios de acueducto, alcantarillado y aseo*. Enlace Publicitario Editores. <https://repositorio.gestion-delriesgo.gov.co/handle/20.500.11762/20088>
- Patiño, S. (2019). *Identificación de áreas susceptibles a amenazas y riesgos naturales provocadas por deslizamiento de tierras mediante el uso de SIG en el cantón Mira*. [Tesis de pregrado, Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Sede Ibarra]. Repositorio Pucesi. <https://dspace.pucesi.edu.ec/handle/11010/281?locale=en>
- Paz Tenorio, J. A., González Herrera, R., Gómez Ramírez, M., & Velasco Herrera, J. A. (2017). Metodología para elaborar mapas de susceptibilidad a procesos de remoción en masa, análisis del casco ladera sur de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. *Investigaciones Geográficas*, 92, 1-16. <https://doi.org/10.14350/rig.52822>
- Pérez, S. (2001). *Modelo para evaluar la erosión hídrica en Colombia utilizando Sistemas de Información Geográfica* [Tesis de especialización, Universidad Industrial de Santander]. <https://bit.ly/3yJJXOq>

- Ruiz Morales, T., & Salazar Duarte, L. (2017). *Determinación de posibles zonas en amenaza por inundación en el municipio de Mompós-Bolívar, mediante el uso de procesamiento digital de imágenes y herramientas SIG y su posterior publicación como datos abiertos (Open Data)* [Tesis de pregrado, Universidad Distrital Francisco José de Caldas]. Repositorio UDISTRITAL. <https://repository.udistrital.edu.co/handle/11349/7269>
- Unidad Nacional Para la Gestión del Riesgo de Desastres [UNGRD]. (2014). *Informe de Gestión 2014*. UNGRD. <http://portal.gestiondelriesgo.gov.co/Paginas/Informe-de-gestion.aspx>

# Revisión bibliográfica del uso de coagulantes naturales como alternativa para el tratamiento de aguas residuales

Bibliographic review use of natural coagulants as an alternative for the treatment of wastewater

María Fernanda Ariza Ruiz\* y Lizeth Liliana Gutiérrez Vargas\*\*

---

---

## Cómo citar:

Ariza Ruiz, M. F., & Gutiérrez Vargas, L. L. (2020). Revisión bibliográfica del uso de coagulantes naturales como alternativa para el tratamiento de aguas residuales. *Ingeciencia*, 5, 95-108.

\* Ingeniera ambiental, Universidad Central. Correo: marizar1@ucentral.edu.co

\*\* Ingeniero ambiental, Universidad Central. Correo: lgutierrezv1@ucentral.edu.co

## Resumen

En el proceso de floculación-coagulación, tradicionalmente se adicionan sales de hierro y aluminio como coagulantes, los cuales generan residuos tóxicos en los lodos producidos, alteran el pH y aumentan la concentración de sales. Con el propósito de conocer alternativas a estos productos, se presenta una revisión bibliográfica sobre polímeros naturales como coagulantes no tóxicos y eficientes en la desestabilización de partículas suspendidas. Para ello, se consultaron en diversas bases de datos artículos de investigación publicados entre 2010 y 2020, en los que se reporta la adición de coagulantes naturales en muestras de agua residual doméstica e industrial real. Los resultados indican que se emplean 25 especies de plantas como coagulantes naturales, entre las cuales se destacan *Moringa oleifera* Lam, *Solanum tuberosum*, *Opuntia ficus indica*, *Pisum sativum*, *Acacia mearnsii*, *Oryza sativa*, *Musa acuminata*, *Strychnos potatorum* y *Brachystegia eurycoma*, con más del 75% de eficiencia en la remoción de turbiedad. Se concluye que el empleo de polímeros naturales mejora los procesos de coagulación, iguala o aumenta la eficiencia de remoción en comparación con los convencionales, no altera el pH y disminuye la toxicidad final.

**Palabras clave:** agua residual doméstica, agua residual industrial, biofloculantes, coagulantes, origen vegetal.

## Abstract

In the flocculation-coagulation process, iron and aluminum salts are traditionally added as coagulants, which generate toxic residues in the sludge produced, alterations in pH and increase the concentration of salts. Therefore, the present bibliographic review aims to search for natural polymers as a non-toxic alternative, efficient in the destabilization of suspended particles. For this purpose, research articles published between 2010-2020 were consulted in various databases, where natural coagulants are added in real domestic and industrial wastewater samples. The consultation carried out indicates the use of 25 natural coagulants, including *Moringa Oleifera* Lam, *Solanum tuberosum*, *Opuntia Ficus Indica*, *Pisum Sativum*, *Acacia Mearnsii*, *Oryza Sativa*, *Musa Acuminata*, *Strychnos Potatorum* and *Brachystegia Eurycoma*, which have a turbidity removal efficiency of over 75%. It is concluded that the use of natural polymers improves the coagulation processes, equals or increases the removal efficiency compared to conventional polymers, does not alter the pH and reduces the final toxicity.

**Keywords:** biofloculants, coagulants, domestic wastewater, industrial wastewater, plant based.

## 1. Introducción

Las aguas residuales son el resultado de procesos domésticos y/o industriales. Dado que están compuestas por sólidos suspendidos, materia orgánica, metales, grasas y aceites, es necesario tratarlos antes de descargarlos a un cuerpo de agua superficial y/o a redes de alcantarillado sanitario, lo cual realizan plantas de tratamiento mediante procesos físicos, químicos y/o biológicos (Orjuela & Lizarazo, 2013). En todo el mundo las aguas residuales son una problemática social y medioambiental, debido a los efectos negativos sobre las fuentes hídricas, la salud y el bienestar de las comunidades, la diversidad biológica, los servicios ecosistémicos, la calidad del agua y su disponibilidad para los usuarios aguas abajo de donde son depositadas.

Uno de los tratamientos primarios más eficaces corresponde a la floculación-coagulación, la cual remueve un considerable porcentaje de turbiedad y contribuye a mejorar otros parámetros en la calidad del agua, como disminuir su color. En este proceso se utilizan productos químicos para desestabilizar las partículas en suspensión y la formación del floc, que posteriormente se decantan para facilitar su remoción; los más utilizados son las sales de aluminio y de hierro (Andía, 2000), debido a su bajo costo y efectividad en anular las cargas superficiales para facilitar la aglomeración y sedimentación de los flóculos, con lo cual se logra una mayor eficiencia en la remoción de los contaminantes. No obstante, el uso de estos productos químicos produce diversas afectaciones, como la alteración en los niveles de pH, mayor producción de lodo y generación de residuos de difícil degradación. Asimismo, debido a la modificación del pH, es necesario adicionar sustancias como cal y soda cáustica para neutralizar el pH de las aguas (Cogollo, 2011).

Ante la limitada información que se encontró en otras investigaciones de revisión bibliográfica, en las cuales solo se abarca un reducido número de coagulantes naturales y las muestras experimentales que emplean son en su mayoría de agua residual sintética, la presente revisión bibliográfica tiene el objetivo de hacer una búsqueda más amplia en la literatura sobre los diferentes coagulantes de origen vegetal que han sido utilizados en muestras de agua residual real, tanto doméstica como industrial.

Los principales resultados de la investigación se refieren a la extracción de los coagulantes de origen vegetal, los casos de aplicación, su uso como coayudante y las desventajas, ventajas y limitaciones que tienen para sustituir productos convencionales. Asimismo, se sugiere la aplicación de algunos de estos coagulantes naturales en Colombia, ya que se encuentran de manera nativa en el país por sus condiciones tropicales.

## 2. Materiales y métodos

La metodología de investigación que se empleó para hacer la revisión constó de tres fases, que se describen en los siguientes apartados.

### 2.1 Búsqueda de la información

Se seleccionaron como fuentes de información las bases de datos ScienceDirect, Scopus, SpringerLink, Redalyc, Scielo, ProQuest y Google Académico. Además, se utilizaron las siguientes palabras clave para realizar la búsqueda: “Biofloculants”, “Wastewater”, “Natural coagulant” y “Plant-based”.

## 2.2 Recolección de la información

Posteriormente, se realizó una revisión de títulos y resúmenes de artículos para seleccionar los que formarían parte de la investigación de acuerdo con los siguientes criterios:

- *Criterios de inclusión:* artículos publicados en el ámbito global que analizaran el tratamiento de agua residual industrial y doméstica aplicando sustancias de origen vegetal como coagulantes en los procesos de coagulación y floculación. El período contemplado fue de 2010 a 2020.
- *Criterios de exclusión:* artículos relacionados con el tratamiento de agua sintética, aguas superficiales, procesos de clarificación, agua potable o que utilicen coagulantes de origen animal. No se tuvo en cuenta trabajos de grado, tesis de maestría ni comentarios de editoriales de revistas.

## 2.3 Organización de la información

Después de seleccionarlos, se caracterizó los artículos en relación con los diferentes coagulantes naturales implementados y se diferenciaron según el agua residual doméstica e industrial, el país o región donde se usaron, las dosis óptimas y la eficiencia de remoción obtenida.

## 3. Resultados y discusión

### 3.1. Coagulantes naturales usados en la remoción de contaminantes de aguas residuales domésticas e industriales

De acuerdo con la revisión bibliográfica, 25 coagulantes naturales fueron reportados para la remoción de contaminantes en aguas residuales domésticas e industriales (tabla 1).

Tabla 1. Identificación de coagulantes naturales

	Nombre común del coagulante	Nombre científico	En cuántos artículos se encontró
1	Plátano	<i>Musa acuminata</i>	4
2	Papaya	<i>Carica papaya</i>	1
3	Neem	<i>Azadirachta indica</i>	1
4	Ipomoea	<i>Ipomoea incarnata</i>	1
5	Moringa oleífera	<i>Moringa oleífera</i>	21
6	Caña fístula	<i>Cassia fistula</i>	1
7	Papa	<i>Solanum tuberosum</i>	1
8	Tamarindo	<i>Tamarindus indica</i>	1
9	Yuca	<i>Manihot esculenta</i>	2
10	Cardón guajiro	<i>Lemnaea gibbera</i>	1
11	Garbanzo	<i>Cicer arietinum</i>	3
12	Arveja	<i>Pisum sativum</i>	1
13	Chayote	<i>Sechium edule</i>	1

	Nombre común del coagulante	Nombre científico	En cuántos artículos se encontró
14	Acacia negra	<i>Acacia melanoxylon</i> <i>Acacia mearnsii</i>	4
15	Goma guar	<i>Cyamopsis tetragonoloba</i>	2
16	Lenteja de agua	<i>Spirodela polyrhiza</i>	1
17	Ciruela india	<i>Ziziphus mauritiana</i>	1
18	Árbol nuez de tala	<i>Strychnos potatorum</i>	1
19	Quimbombó / okra	<i>Abelmoschus esculentus</i>	1
20	---	<i>Brachystegia eurycoma</i>	1
21	Guarumo	<i>Cecropia obtusifolia</i>	2
22	Almidón de arroz	<i>Oryza sativa</i>	1
23	Llantén de la India	<i>Plantago ovata</i>	1
24	Nopal	<i>Opuntia ficus-indica</i>	2
25	Mezquite	<i>Prosopis laevigata</i>	1

Fuente: elaboración propia.

Las propiedades de coagulación de estas especies se les atribuyen a los polisacáridos y proteínas que contienen.

### 3.2 Extracción del principio activo

Para que los coagulantes naturales sean aprovechados en su máximo potencial para la floculación-coagulación es necesario extraer el compuesto activo.

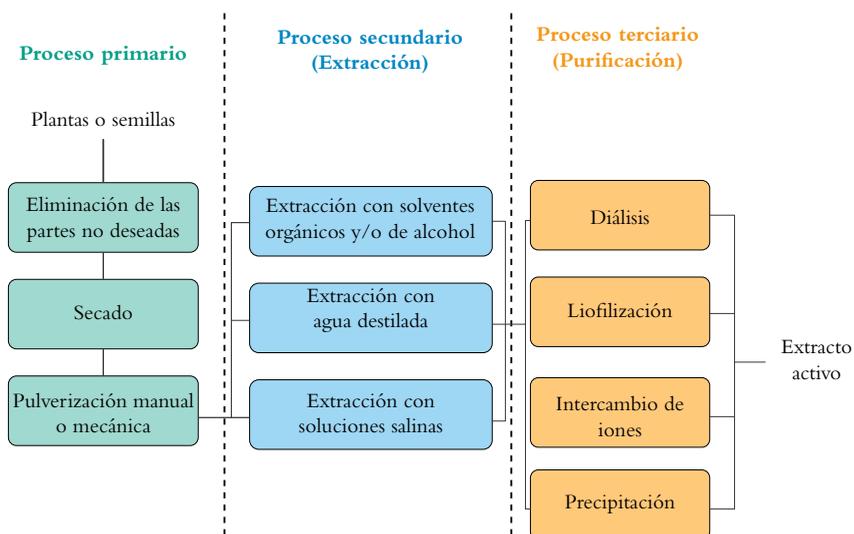


Figura 1. Extracción general de coagulantes naturales. Fuente: adaptado de Yin (2010).

Al respecto, cabe señalar que algunos estudios muestran que la eficiencia en la coagulación de las semillas de *M. oleifera* aumenta considerablemente si sus agentes activos se extraen con una solución como NaCl o KCl. Así mismo, encontraron que una semilla extraída con NaCl al 1M mejoró el proceso de coagulación 7,4 veces más que si la extracción se hubiera realizado con agua destilada, lo cual se debe a que estos compuestos contienen sales que aumentan la solubilidad de las proteínas (Boulaadjoul *et al.*, 2018).

### 3.3 Efectividad del uso de coagulantes naturales

La efectividad de los coagulantes se comprobó en diferentes tipos de agua (doméstica e industrial) y en distintos sectores, como se describe a continuación.

El agua residual doméstica se caracteriza por que tiene considerables concentraciones de demanda biológica de oxígeno (DBO5), demanda química de oxígeno (DQO), sólidos suspendidos totales (SST), aceites y grasas. En Rosmawanie *et al.* (2018), la turbiedad fue reducida en el 80,02% usando *C. arietinum* y el 86,24% utilizando *Moringa oleifera* con una dosis óptima de 180 mg/L. Además, después de compararlos con dos coagulantes químicos, se concluyó que las dosis de los coagulantes naturales pueden ser más altas que las requeridas por los coagulantes químicos, pero superan los porcentajes de remoción de turbiedad.

Menkiti *et al.* (2018) reportan el uso de *Brachystegia eurycoma* para tratar el agua residual proveniente de la producción de pintura en Nigeria, que se realiza de pequeña a mediana escala. El agua residual de esta industria no es biodegradable, presenta alta coloración y turbidez, además contiene sustancias tóxicas, aceites y solventes. Específicamente, al utilizar una dosis óptima de 5000 mg/L de *Brachystegia eurycoma* se logró remover el 96,5% de la turbiedad (Menkiti *et al.*, 2018).

Las aguas residuales de textiles y lavanderías contienen altas concentraciones de sales, sólidos suspendidos, DBO, DQO y otros compuestos tóxicos que son el resultado de los tintes u otros productos usados en estas industrias, los cuales pueden ser cancerígenos y/o mutagénicos. Si estas aguas no reciben el debido tratamiento y son vertidas, pueden causar grandes afectaciones al medio ambiente y alterar los sistemas biológicos, especialmente la fotosíntesis. En una investigación de Almeida *et al.* (2017), las aguas residuales de una textilería de jeans localizada en Paraná, Brasil, fueron tratada con una dosis óptima de 15 mg/L de extracto vegetal de chayote, con lo cual se removió el 97,95% de la turbidez y el 83,84% de la DQO (Almeida *et al.*, 2017).

Las características de las aguas residuales producidas por la agroindustria dependen del tipo de materia prima y los productos que se utilicen, pero en general suelen tener una alta DQO y SST, los cuales pueden causar problemas de contaminación. Por ejemplo, en Malasia se producen cada año aproximadamente cincuenta millones de toneladas de aguas residuales al extraer aceite de palma. Como alternativa de tratamiento, Teh *et al.* (2014) encontraron que una dosis óptima de 740 mg/L de almidón de arroz reduce el 92,50% de los SST y el 30,91% de la DQO.

Los efluentes industriales procedentes de las fábricas de papel contienen altos niveles de DBO y DQO, debido a la presencia de lignina y otros derivados de sus materias primas, como los celulósicos, compuestos clorados y sólidos en suspensión (fibras, fibrillas, CaCO<sub>3</sub>, arcillas). En Argelia, se encontró que una dosis óptima de 150 mg/L de *Moringa oleifera* permite remover el 96,02% de la turbidez y el 97,28% de DQO de estas aguas residuales (Boulaadjoul *et al.*, 2018).

En las plantas de sacrificio animal en el municipio de Popayán, Colombia, en donde mensualmente se sacrifican un aproximado de noventa animales, entre bovinos y porcinos, las aguas residuales contienen sangre, estiércol, pelos, huesos, grasas, proteínas, contaminantes solubles, elementos patógenos, valores altos de parámetros como temperatura, concentración de compuestos orgánicos y nitrógeno. Para tratar estas aguas se usaron semillas de *Moringa oleifera* con una dosis óptima de 7 500 mg/L, lo cual permitió remover el 86,7% de turbidez y el 93% del color (Arias-Hoyos *et al.*, 2017).

### 3.4 Coagulantes naturales como coayudantes

Freitas *et al.* (2015) encontraron que emplear *Abelmoschus esculentus* como ayudante de un coagulante inorgánico de hierro disminuye la dosis del coagulante químico de 320 mg/L a 88 mg/L, a partir de lo cual ajustaron una nueva dosis de coagulante natural de 2,4 mg/L a 3,2 mg/L. Esto quiere decir que al usar en combinación una dosis baja de coagulante, tanto químico como natural, se removió el 92,24% de la turbiedad, el 85,69% de DQO y el 93,57% de color a un pH de 6. Asimismo, reportaron que añadir el mucílago extraído del okra permitió reducir el coagulante químico en 72,5%.

Por su parte, Teh *et al.* (2014) compararon el tratamiento de efluentes de una fábrica de aceite de palma usando almidón de arroz y almidón de arroz-alumbre. Sus resultados indican que esta combinación reduce la dosis requerida si solo se emplea alumbre, se pasa de 730 mg/L a 380 mg/L y se aumenta el porcentaje de remoción de DQO, aunque se obtienen mejores resultados en la remoción de SST al utilizar solo almidón.

Finalmente, la literatura consultada reporta que las plantas de concreto utilizan grandes cantidades de agua, que se convierten en residuos líquidos con altas cantidades de sólidos en suspensión, de manera que tienen una turbiedad elevada. Al utilizar 80% de sulfato de aluminio y 20% de *Moringa oleifera*, De Paula (*et al.*, 2014) lograron remover el 99,5% de la turbiedad y redujeron la alta alcalinidad que tenía el agua residual tratada.

### 3.5 Desventajas del uso de coagulantes químicos

Los coagulantes inorgánicos y compuestos sintéticos pueden producir cambios en el pH del agua, de manera que es necesario adicionar estabilizadores para cumplir con los rangos permisibles de este parámetro, según la normatividad de vertimientos de cada país (Cabrera *et al.*, 2018). Además, los lodos que generan producen una contaminación secundaria, pues se caracterizan por tener baja biodegradabilidad y potencial limitado para un uso posterior.

Los coagulantes químicos se encuentran en el mercado a bajo precio y son eficaces para el tratamiento de aguas, pero tienen impactos negativos en el ambiente y en la calidad del agua, no son biodegradables y pueden tener efectos toxicológicos en la fauna acuática (Pandey *et al.*, 2020). Además, sustancias como el alumbre pueden dejar altas concentraciones de aluminio residual en el agua tratada (Freitas *et al.*, 2015), las cuales pueden estar relacionadas con la aparición de enfermedades como el Alzheimer (Arias-Hoyos *et al.*, 2017).

### 3.6 Ventajas del uso de coagulantes naturales

En los diferentes artículos consultados para esta revisión se menciona en repetidas ocasiones que los coagulantes naturales son una alternativa de bajo costo, son biodegradables y tienen poca toxicidad, además se encuentran de manera abundante para extraerlos (Freitas

*et al.*, 2015). Los coagulantes naturales forman flóculos más fuertes debido al efecto puente, en comparación con los coagulantes químicos como el alumbre (Yin, 2010). Además, se reduce la concentración de sustancias químicas en los vertimientos, lo que a su vez genera un impacto positivo porque mejora los ecosistemas y las condiciones sanitarias aguas abajo del punto de descarga (Arias-Hoyos *et al.*, 2017).

A continuación, se sintetizan algunos de los estudios identificados en la búsqueda bibliográfica. Nonfodji *et al.* (2020) reportaron que el uso de *Moringa oleifera* en el agua residual obtenida del Centro Hospitalario de Benín tuvo una eficiencia del 76,82% para eliminar la bacteria *Escherichia coli*. También respecto a estas semillas, Villaseñor-Basulto *et al.* (2018) describieron que tienen actividad antibacteriana frente a gram negativas y gram positivas, además de que han mostrado actividad antimicótica.

Además, también se debe señalar que los coagulantes naturales no alteran de forma considerable los parámetros del agua. Al respecto, Ramavandi y Farjadfard (2014) concluyeron que al utilizar el *Plantago ovata* la relación DBO5/DQO aumentó de 0,19 (agua sin tratamiento) a 0,48 en las condiciones óptimas, por lo que la biodegradabilidad del agua textil aumentó y, en consecuencia, se puede tratar de manera biológica.

### 3.7 Limitaciones en la sustitución de coagulantes convencionales

En la información obtenida en la literatura recolectada solo se reporta la aplicación de coagulantes naturales a escala de laboratorio, es decir, no se evidencia que se implementen a escala real en plantas piloto de agua residual doméstica ni industrial, pese a encontrar un número considerable de artículos de investigación con argumentos y demostración experimental de la efectividad de estas especies vegetales.

Según Ang y Mohammad (2020), los retos que tienen los coagulantes naturales para ser aceptados son: la producción en masa, cuestiones técnicas, suministro continuo de una cantidad de coagulante con las propiedades requeridas, sin que se vean afectadas por diferencias en la extracción y la purificación.

Asimismo, se destaca que si bien los coagulantes naturales se encuentran a un menor precio, no se evidencian estudios en los cuales se puedan entrever los costos de la materia prima, la extracción, la purificación y la operación, de modo que sea posible realizar una comparación económica entre estas sustancias y los coagulantes químicos convencionales usados en la actualidad (Ang & Mohammad, 2020). Tampoco se localizaron investigaciones sobre los impactos ambientales y la sostenibilidad de los coagulantes químicos, por lo cual se necesitan más estudios sobre el tema.

### 3.8 Coagulantes sugeridos para Colombia

De acuerdo con los resultados de la revisión bibliográfica, se sugiere que en Colombia se usen los siguientes coagulantes naturales como sustitutos en las plantas de tratamiento de aguas residuales doméstica e industrial: *Ipomoea incarnata*, *Solanum tuberosum* (papa), *Lemnaea gibbera* (Cardón guajiro), *Musa acuminata* (plátano), *Pisum sativum* (arveja), *Acacia melanoxylon* (acacia negra), *Spirodela polyrhiza* (lenteja de agua), *Ziziphus mauritiana* (ciruela india), *Cecropia obtusifolia* (guarumo), *Oryza sativa* (arroz) y *Moringa oleifera*, debido a que estas especies obtuvieron porcentajes de remoción de turbiedad, DQO y sólidos suspendidos totales por encima al 70%.

## 4. Conclusiones

La revisión de literatura sobre el uso de coagulantes naturales para tratar aguas residuales domésticas e industriales en procesos de floculación-coagulación arrojó 25 productos extraídos de semillas, hojas, tallos de árboles y plantas. El uso de estos coagulantes se reportó en quince países, de los cuales solamente diez se hicieron en la zona intertropical, que es donde se encuentra la mayor diversidad de especies vegetales. Por lo tanto, se puede afirmar que el uso de los coagulantes naturales depende de las condiciones geográficas del país o la región y de la disponibilidad de las plantas en los territorios donde fueron usados.

Los artículos seleccionados reportaron la aplicación de coagulantes naturales en muestras de aguas residuales obtenidas de diferentes industrias (sector textil, agroindustrial, alimentos, concreto, refinería, hospitales) y recolectadas de plantas de tratamiento de agua residual doméstica. De acuerdo con la información analizada, 18 de los 25 coagulantes encontrados obtuvieron remociones de turbidez por encima al 75%. Además, se debe destacar que *Moringa oleifera* Lam, *Solanum tuberosum*, *Opuntia ficus indica*, *Pisum sativum*, *Acacia mearnsii*, *Oryza sativa*, *Musa acuminata*, *Strychnos potatorum* y *Brachystegia eurycoma* obtuvieron un porcentaje de remoción de contaminantes mayor al 90%, al igual que lo hacen los coagulantes convencionales de aluminio o hierro.

Respecto a las dosis óptimas que establecieron los artículos analizados en la revisión, se halló que estas pueden variar dependiendo de varios factores, tales como el tipo de coagulante usado y su proceso de extracción y purificación. De igual manera, la información muestra que los contaminantes difieren en la muestra que se va a tratar dependiendo de si es doméstica o industrial. No se evidencia un patrón en las dosis óptimas halladas experimentalmente, por lo tanto no es posible establecer un rango de aplicación.

De otra parte, se registra que los coagulantes naturales no producen cambios significativos en el pH final, por lo cual no es necesario adicionar sustancias estabilizadoras, en comparación con las sales de hierro o aluminio. Antes bien, mejoran parámetros como la demanda química de oxígeno (DQO) y los sólidos suspendidos totales (SST), al tiempo que remueven entre el 90% y 100% de coliformes, lo cual se atribuye a las propiedades antibacterianas que algunos contienen. Además, los autores reportan que el uso de coagulantes naturales disminuye de forma considerable el volumen de los lodos generados y proponen que estos sean utilizados como fertilizantes o biomasa, dependiendo de su composición.

Finalmente, se concluye que, de acuerdo con las condiciones tropicales de Colombia, es posible implementar en el país coagulantes naturales en las plantas de tratamiento de agua residual doméstica o industrial, debido a que alrededor de dieciséis especies del total de los coagulantes identificados son cultivadas o se encuentran de manera nativa.

## Referencias

- Almeida, C. A., De Souza, M. T. F., Freitas, T. K. F. S., Ambrósio, E, Geraldino, H. C. L., & Garcia, J. C. (2017). Vegetable residue of Chayote (*Sechium edule* SW.) as a natural coagulant for treatment of textile wastewater. *International Journal of Energy and Water Resources*, 1(1), 37-46. <https://bit.ly/3ajllSc>

- Andía, Y. (2000). *Tratamiento de agua: Coagulación y floculación*. Sedapal. <https://bit.ly/3bW4bvD>
- Ang, W. L., & Mohammad, A. W. (2020). State of the art and sustainability of natural coagulants in water and wastewater treatment. *Journal of Cleaner Production*, 262, Article 121267. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121267>
- Arias-Hoyos, A., Hernández-Medina, J. L., Castro-Valencia, A. F., & Sánchez-Peña, N. E. (2017). Tratamiento de aguas residuales de una central de sacrificio: Uso del polvo de la semilla de la *M. oleifera* como coagulante natural. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 15(1), 29-39. <https://revistas.unicauca.edu.co/index.php/biotecnologia/article/view/548>
- Boulaadjoul, S., Zemmouri, H., Bendjama, Z., & Drouiche, N. (2018). A novel use of *Moringa oleifera* seed powder in enhancing the primary treatment of paper mill effluent. *Chemosphere*, 206, 142-149. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.04.123>
- Cabrera, N. C., Simancas Vásquez, E. P., & Hernández Julio, A. R. (2018). Ensayo de coagulantes naturales extraídos de *Ipomoea incarnata* y *Moringa olífera* en la depuración de aguas residuales industriales en Cartagena de Indias. *Prospectiva*, 16(2), 94-99. <https://doi.org/10.15665/rp.v16i2.1434>
- Cogollo Flórez, J. M. (2011). Clarificación de aguas usando coagulantes polimerizados: Caso del hidroxicloriguro de aluminio. *Dyna*, 78(165), 18-27. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=49622372002%0ACómo>
- De Paula, H. M., De Oliveira Ilha, M. S., & Andrade, L. S. (2014). Concrete plant wastewater treatment process by coagulation combining aluminum sulfate and *Moringa oleifera* powder. *Journal of Cleaner Production*, 76, 125-130. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.04.031>
- Freitas, T. K. F. S., Oliveira, V. M., De Souza, M. T. F., Geraldino, H. C. L., Almeida, V. C., Fávaro, S. L., & Garcia, J. C. (2015). Optimization of coagulation-flocculation process for treatment of industrial textile wastewater using okra (*A. esculentus*) mucilage as natural coagulant. *Industrial Crops and Products*, 76, 538-544. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.06.027>
- Menkiti, M. C., Okoani, A. O., & Ejimofor, M. I. (2018). Adsorptive study of coagulation treatment of paint wastewater using novel *Brachystegia eurycoma* extract. *Applied Water Science*, 8(6), Article 189. <https://doi.org/10.1007/s13201-018-0836-1>
- Nonfodji, O. M., Fatombi, J. K., Ahoyo, T. A., Osseni, S. A., & Aminou, T. (2020). Performance of *Moringa oleifera* seeds protein-polyaluminum chloride composite coagulant in removing organic matter and antibiotic resistant bacteria from hospital wastewater. *Journal of Water Process Engineering*, 33, Article 101103. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2019.101103>
- Orjuela, M. I., & Lizarazo, J. M. (2013). *Sistemas de plantas de tratamiento de aguas residuales en Colombia* [Monografía de especialización, Universidad Nacional de Colombia]. Repositorio UN. <https://bit.ly/3OQ03Me>
- Pandey, N., Gusain, R., & Suthar, S. (2020). Exploring the efficacy of powered guar gum (*Cyamopsis tetragonoloba*) seeds, duckweed (*Spirodela polyrhiza*), and Indian plum (*Ziziphus mauritiana*) leaves in urban wastewater treatment.

- Journal of Cleaner Production*, 264, Article 121680. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121680>
- Rosmawanie, M., Mohamed, R., Al-Gheethi, A., Pahazri, F., Amir-Hashim, M. K., & Nur-Shaylinda, M. Z. (2018). Sequestering of pollutants from public market wastewater using *Moringa oleifera* and *Cicer arietinum* flocculants. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 6(2), 2417-2428. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.03.035>
- Teh, C.Y., Wu, T.Y., & Juan, J. C. (2014). Optimization of agro-industrial wastewater treatment using unmodified rice starch as a natural coagulant. *Industrial Crops and Products*, 56, 17-26. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2014.02.018>
- Villaseñor-Basulto, D. L., Astudillo-Sánchez, P. D., Del Real-Olvera, J., & Bandala, E. R. (2018). Wastewater treatment using *Moringa oleifera* Lam. seeds: A review. *Journal of Water Process Engineering*, 23, 151-164. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2018.03.017>
- Yin, C. Y. (2010). Emerging usage of plant-based coagulants for water and wastewater treatment. *Process Biochemistry*, 45(9), 1437-1444. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2010.05.030>

### Otras referencias revisadas

- Adelodun, B., Ogunshina, M. S., Ajibade, F. O., Abdulkadir, T. S., Bakare, H. O., & Choi, K. S. (2020). Kinetic and prediction modeling studies of organic pollutants removal from municipal wastewater using *Moringa oleifera* biomass as a coagulant. *Water (Switzerland)*, 12(7), Article 2052. <https://doi.org/10.3390/w12072052>
- Alwi, H., Idris, J., Musa, M., & Ku Hamid, K. H. (2013). A preliminary study of banana stem juice as a plant-based coagulant for treatment of spent coolant wastewater. *Journal of Chemistry*, 2013, Article 165057. <https://doi.org/10.1155/2013/165057>
- Barbosa, A. D., Da Silva, L. F., De Paula, H. M., Romualdo, L. L., Sadoyama, G., & Andrade, L. S. (2018). Combined use of coagulation (*M. oleifera*) and electrochemical techniques in the treatment of industrial paint wastewater for reuse and/or disposal. *Water Research*, 145, 153-161. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.08.022>
- Bouatay, F., & Mhenni, F. (2014). Use of the Cactus Cladodes Mucilage (*Opuntia Ficus Indica*) as an eco-friendly flocculants: Process development and optimization using stastical analysis. *International Journal of Environmental Research*, 8(4), 1295-1308. <https://doi.org/10.22059/IJER.2014.822>
- Carpinteyro-Urban, S., & Torres, L. (2013). Use of response surface methodology in the optimization of coagulation-flocculation of wastewaters employing biopolymers. *International Journal of Environmental Research*, 7(3), 717-726. <https://doi.org/10.22059/IJER.2013.651>
- Dehghani, M., & Alizadeh, M. H. (2016). The effects of the natural coagulant *Moringa oleifera* and alum in wastewater treatment at the Bandar Abbas Oil Refinery. *Environmental Health Engineering and Management Journal*, 3(4), 225-230. <https://doi.org/10.15171/ehem.2016.24>

- Dela Justina, M., Rodrigues Bagnolin Muniz, B., Mattge Bröring, M., Costa, V. J., & Skoronski, E. (2018). Using vegetable tannin and polyaluminium chloride as coagulants for dairy wastewater treatment: A comparative study. *Journal of Water Process Engineering*, 25, 173-181. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2018.08.001>
- Dos Santos, J. D., Veit, M. T., Juchen, P. T., Da Cunha Gonçalves, G., Moreno Palácio, S., & Fagundes-Klen, M. (2018). Use of different coagulants for cassava processing wastewater treatment. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 6(2), 1821-1827. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.02.039>
- Dotto, J., Fagundes-Klen, M. R., Veit, M. T., Moreno Palácio, S. M., & Bergamasco, R. (2019). Performance of different coagulants in the coagulation/flocculation process of textile wastewater. *Journal of Cleaner Production*, 208, 656-665. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.112>
- Duarte, D., & Ramírez, L. F. (2015). Remoción de nutrientes mediante coagulantes naturales y químicos en planta de tratamiento de aguas residuales, Valledupar Colombia. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 6(2), 183-195. <https://doi.org/10.22490/21456453.1415>
- Durán Hernández, Z. L., Roa, R., Coronel, D., & Alvarado, A. (2017). Análisis del proceso de coagulación de un agua residual usando un coagulante natural y un coagulante químico. *Documentos de Trabajo ECAPMA*, 2. <https://doi.org/10.22490/ECAPMA.1821>
- Flores Pérez, L. A., Lostado Lorza, R., & Corral Bobadilla, M. (2019). Uso del programa simapro para evaluar coagulantes naturales en el tratamiento de aguas. *Biotecnía*, 21(3), 108-113. <https://doi.org/10.18633/biotecnia.v21i3.1039>
- Fuentes Molina, N., Molina Rodríguez, E. J., & Ariza, C. P., (2016). Coagulantes naturales en sistemas continuos como sustituto del Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> para clarificación de aguas. *Producción Limpia*, 11(2), 41-54. <https://doi.org/10.22507/pml.v11n2a4>
- Gopika, G. L., & K. Mophin, K. (2016). Accessing the suitability of using banana pith juice as a natural coagulant for textile wastewater treatment. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 7(4), 260-264. <https://bit.ly/3RfHqTe>
- Guardián-López, R., & Coto-Campos, J. (2010). Estudio preliminar del uso de la semilla de tamarindo (*Tamarindus indica*) en la coagulación-floculación de aguas residuales. *Tecnología en Marcha*, 24(2), 18-26. [https://revistas.tec.ac.cr/index.php/tec\\_marcha/article/view/138](https://revistas.tec.ac.cr/index.php/tec_marcha/article/view/138)
- Herrera, M. (2015). Evaluación del almidón de papa como floculante para el tratamiento de aguas residuales domésticas. *@limentech Ciencia y Tecnología Alimentaria*, 13(2), 123-135. <https://doi.org/https://doi.org/10.24054/16927125.v2.n2.2015.1877>
- Jagaba, A. H., Kutty, S. R. M., Hayder, G., Latiff, A. A. A., Aziz, N. A. A., Umaru, I., Ghaleb, A. A. S., Abubakar, S., Lawal, I. M., & Nasara, M. A. (2020). Sustainable use of natural and chemical coagulants for contaminants removal from palm oil mill effluent: A comparative analysis. *Ain Shams Engineering Journal*, 11(4), 951-960. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2020.01.018>

- Jaseela, L., & Chadaga, M. (2015). Treatment of dairy effluent using *Cicer arietinum*. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 4(6), 15047-15053. <https://doi.org/10.15680/IJIRSET.2015.0406140>
- Kumar, V., Othman, N., & Asharuddin, S. (2017). Applications of natural coagulants to treat wastewater – A review. *MATEC Web of Conferences*, 103, Article 06016. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201710306016>
- Lek, B. L., Peter, A. P., Qi Chong, K. H., Ragu, P., Sethu, V., Selvarajoo, A., & Arumugasamy, S. K. (2018). Treatment of palm oil mill effluent (POME) using chickpea (*Cicer arietinum*) as a natural coagulant and flocculant: Evaluation, process optimization and characterization of chickpea powder. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 6(5), 6243-6255. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.09.038>
- Maurya, S., & Daverey, A. (2018). Evaluation of plant-based natural coagulants for municipal wastewater treatment. *3 Biotech*, 8, Article 77. <https://doi.org/10.1007/s13205-018-1103-8>
- Menkiti, M., Nwoye, C., Onyechi, C., & Onukwuli, O. (2011). Factorial optimization and kinetics of coal washery effluent coag-flocculation by *Moringa oleifera* seed biomass. *Advances in Chemical Engineering and Science*, 1(03), 125-132. <https://doi.org/10.4236/aces.2011.13019>
- Mera-Alegría, C. F., Gutiérrez-Salamanca, M. L., Montes-Rojas, C., & Paz-Concha, J. P. (2016). Efecto de la *Moringa Oleifera* en el tratamiento de aguas residuales en el Cauca, Colombia. *Bioteología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 14(2), 100-109. [https://doi.org/10.18684/bsaa\(14\)100-109](https://doi.org/10.18684/bsaa(14)100-109)
- Muralimohan, N., Palanisamy, T., & Vimaladevi, M. N. (2014). Experimental study on removal efficiency of blended coagulants in textile wastewater treatment. *Impact: International Journal of Research in Engineering & Technology*, 2(2), 15-20. <https://bit.ly/3RcoV2b>
- Natarajan, R., Al Fazari, F., & Al Saadi, A. (2018). Municipal waste water treatment by natural coagulant assisted electrochemical technique— Parametric effects. *Environmental Technology and Innovation*, 10, 71-77. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2018.01.011>
- Ortiz Alcocer, V., López Ocaña, G., Torres Belcazar, C. A., & Pampillón González, L. (2018). Almidón de yuca (*Manihot esculenta* Crantz) como coadyuvante en la coagulación floculación de aguas residuales domésticas. *CIBA Revista Iberoamericana de las Ciencias Biológicas y Agropecuarias*, 7(13), 18-46. <https://doi.org/10.23913/ciba.v7i13.73>
- Palmero, J., & Lías, J. (2018). Efecto de la semilla de moringa (*Moringa oleifera* Lam.) como coagulante natural en una agua residual de origen agroindustrial. *Revista Ambientellanía*, 1, 87-97.
- Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos de las Naciones Unidas. (2017). *Informe mundial de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos: Aguas residuales: El recurso desaprovechado*. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000247647>

- Radin, M. S. R., Ibrahim, N. M. A., & Mohd, A. H. (2014). Efficiency of using commercial and natural coagulants in treating car wash wastewater treatment. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 8, 227-234. <https://doi.org/http://eprints.uthm.edu.my/id/eprint/6209>
- Ramavandi, B., & Farjadfard, S. (2014). Removal of chemical oxygen demand from textile wastewater using a natural coagulant. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 31(1), 81-87. <https://doi.org/10.1007/s11814-013-0197-2>
- Sandoval Arreola, M., Navarrete Teodoro, L., Olais Pineda, J., & Ortiz Rodríguez, G. (2018). Evaluación de la eficiencia de un polímero natural en el tratamiento de aguas residuales domésticas. *Multidisciplinas de la Ingeniería*, 6(8), 37-46. <https://bit.ly/3yJ9Ei0>
- Servyeco. (2018). *Ecotan: Productos naturales para tratamientos de aguas*. [https://bewat.eu/wp-content/uploads/2018/06/ECOTAN\\_ED12.pdf](https://bewat.eu/wp-content/uploads/2018/06/ECOTAN_ED12.pdf)
- Servyeco. (n. d.). *Serie ECOTAN: Coagulantes naturales*. <https://bit.ly/3acVtsp>
- Shak, K. P.Y., & Wu, T.Y. (2014). Coagulation-flocculation treatment of high-strength agro-industrial wastewater using natural *Cassia obtusifolia* seed gum: Treatment efficiencies and flocs characterization. *Chemical Engineering Journal*, 256, 293-305. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2014.06.093>
- Shak, K. P.Y., & Wu, T.Y. (2017). Synthesis and characterization of a plant-based seed gum via etherification for effective treatment of high-strength agro-industrial wastewater. *Chemical Engineering Journal*, 307, 928-938. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.08.045>
- Soares, G., Passos, Y., & de Oliveira, A. (2020). Avaliação do uso da *Moringa oleifera* no tratamento de efluente proveniente de usina de concreto. *Brazilian Journal of Development*, 6(6), 32822-32835. <https://doi.org/10.34117/bjdv6n6-002>
- Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios. (2013). *Informe técnico sobre sistemas de tratamiento de aguas residuales*. <https://bit.ly/3NOOgfA>
- Tarón-Dunoyer, A., Guzmán-Carrillo, L.E., & Barros-Portnoy, I. (2017). Evaluación de la *Cassia fistula* como coagulante natural en el tratamiento primario de aguas residuales. *Orinoquia*, 21(1), 73-78. <https://doi.org/10.22579/20112629.396>
- Ugwu, S. N., Umuokoro, A. F., Echiegu, E. A., Ugwuishiwu, B. O., & Enweremadu, C. C. (2017). Comparative study of the use of natural and artificial coagulants for the treatment of sullage (domestic wastewater). *Cogent Engineering*, 4, Article 1365676. <https://doi.org/10.1080/23311916.2017.1365676>
- Vunain, E., Masoamphambe, E. F., Mpeketula, P. M. G., Monjerezi, M., & Etale, A. (2019). Evaluation of coagulating efficiency and water borne pathogens reduction capacity of *Moringa oleifera* seed powder for treatment of domestic wastewater from Zomba, Malawi. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 7(3), Article 103118. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2019.103118>
- Wolf, G., Schneider, R. M., Bongiovani, M. C., Morgan Uliana, E., & Garcia do Amaral, A. (2015). Application of coagulation/flocculation process of dairy wastewater from conventional treatment using natural coagulant for reuse. *Chemical Engineering Transactions*, 43, 2041-2046. <https://doi.org/10.3303/CET1543341>

# Identificación de las principales áreas de recarga de acuíferos en la zona media del departamento del Cesar

Identification of the main aquifer recharge areas in the middle zone of the department of Cesar

Ingrid Lorena Pinzón Pulido\* y Ángela Patricia Alfonso Palacios\*\*

---

---

## Cómo citar:

Pinzón Pulido, I. L., & Alfonso Palacios, A. P. (2020). Identificación de las principales áreas de recarga de acuíferos en la zona media del departamento de Cesar. *Ingeciencia*, 5, 109-124.

\* Ingeniera ambiental, Universidad Central. Correo: ipinzonp@ucentral.edu.co  
\*\* Ingeniera ambiental, Universidad Central. Correo: aalfonsop@ucentral.edu.co

## Resumen

En Colombia, uno de los departamentos afectados con fuerza en las últimas décadas por la escasez de agua es el Cesar, caracterizado por sus suelos áridos y la extracción minera de carbón, que contribuye a la erosión del suelo y a la contaminación de fuentes hídricas. El objetivo de este trabajo es identificar las principales áreas de recarga de acuíferos en la zona media del departamento del Cesar con el fin de favorecer el aprovechamiento del recurso hídrico subterráneo. Se sintetizó información hidrológica y geográfica de la zona para construir mapas de precipitación, geología, textura de suelos, permeabilidad, usos del suelo, densidad de drenajes y densidad de fallas, que posteriormente fueron analizados y procesados con la herramienta *álgebra de mapas* de ArcGIS. El resultado indica que las principales zonas de recarga están ubicadas en el norte del área de estudio, específicamente en los municipios de Becerril, El Paso y Agustín Codazzi. Esta información permite orientar, planificar y gestionar la provisión del recurso hídrico subterráneo en las áreas identificadas.

**Palabras clave:** escasez, geología, hidrología, recurso hídrico subterráneo, suelos áridos.

---

## Abstract

In Colombia, one of the departments strongly affected during the last decades by the water shortage is Cesar, whose main characteristics are its arid soils and coal mining that contributes to soil erosion and contamination of water sources. The objective of this work is to identify the main aquifer recharge areas in the middle zone of the department of Cesar in order to favor the use of groundwater resources. Hydrological and geographic information of the area was gathered for the construction of maps of precipitation, geology, soil texture, permeability, land use, drainage density and fault density, which were later analyzed and processed with the ArcGIS map algebra tool, resulting in the main recharge areas of the middle zone of the department of Cesar, where it was identified that most of these are located to the north of the study area, specifically in the municipalities of Becerril, El Paso and Agustín Codazzi; This will make it possible to guide, plan and manage the provision of the groundwater resources of the previously identified areas.

**Keywords:** arid soils, geology, hydrology, scarcity, water resource.

## 1. Introducción

El mundo, hoy en día, se ha visto afectado por la escasez de agua debido a que las principales fuentes hídricas del planeta han sido contaminadas o sobreexplotadas para cubrir la demanda del recurso en zonas superpobladas. A su vez, las Naciones Unidas, en el segundo informe sobre el desarrollo del recurso hídrico en el mundo que entregó en el 2006, afirma que “el agua es una responsabilidad compartida y que la insuficiencia de agua se debe a un abastecimiento ineficaz y no a la ausencia del recurso en sí” (Programa Mundial de la Unesco de Evaluación de Recursos Hídricos, 2006), a lo cual también contribuye la falta de inversión del Estado, tanto en capital humano competente como en infraestructura física adecuada (Anaya, 2018). Asimismo, se debe agregar la descoordinación y dispersión de la política del agua, la percepción errónea sobre la abundancia y riqueza hídrica del país y el disimulo o desinterés con que se ignoran las múltiples presiones que se ciernen sobre el agua (Zamudio, 2012)

En Colombia, según el reporte de avance del Estudio Nacional del Agua, en el año 2018 se identificaron los municipios con susceptibilidad al desabastecimiento, en el cual se afirma que el departamento del Cesar tiene una afectación del 88% en el total de sus municipios, de manera que se ubica en el tercer lugar en cuanto a susceptibilidad de desabastecimiento de agua en el país. Debido a esto es importante realizar estudios para determinar la disponibilidad de agua en el departamento y de esta forma plantear estrategias para contrarrestar la escasez, pues actualmente no se cuenta con información clara respecto a la recarga de acuíferos. Una alternativa viable puede ser aprovechar las aguas subterráneas, respecto a las cuales se tiene conocimiento de 1118 puntos de extracción (pozos, aljibes, manantiales, aljibes-pozos) distribuidos en todo el departamento (Corporación Autónoma Regional del Cesar [Corpopesar], 2006).

Colombia tiene pocos estudios sobre los procesos de recarga. Uno de estos propone una metodología que fue aplicada en el Valle de Aburrá para delimitar zonas de recarga y sistemas regionales de flujo a un acuífero (Escobar *et al.*, 2017). En este trabajo se emplearon técnicas de decisión multicriterio para identificar y determinar la importancia relativa de los distintos factores que pueden incidir en la recarga, análisis que fue apoyado en juicios de expertos y soportado en evaluaciones cuantitativas (Escobar *et al.*, 2017).

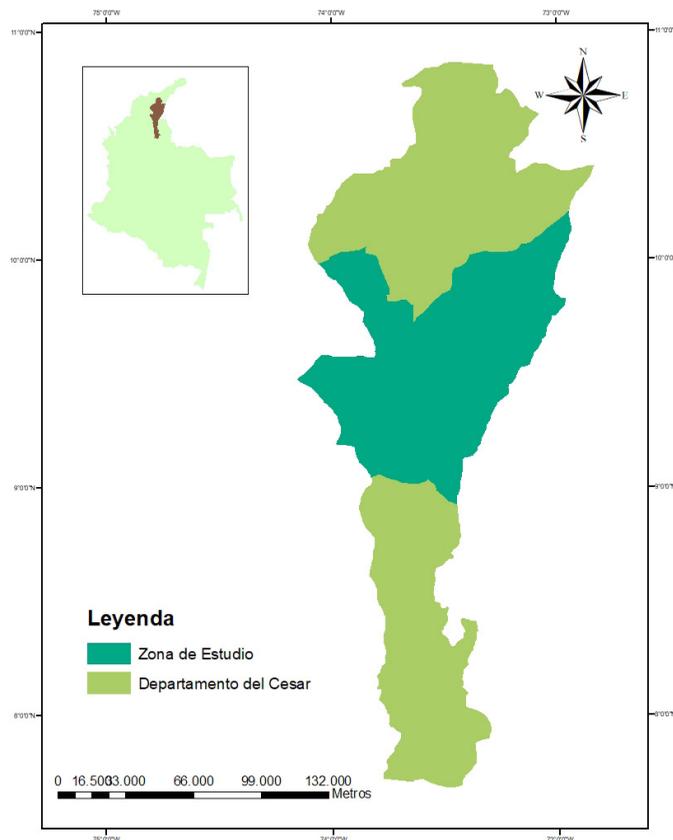
Concretamente, esta investigación identifica las principales áreas de recarga de acuíferos en la zona media del departamento del Cesar aplicando procedimientos que fueron usados en otras regiones del país. Así, se analizan variables hidrológicas y geológicas, como el balance hídrico de la zona, la porosidad y la permeabilidad de los suelos, y el uso y la textura de suelos, con el fin de categorizar las zonas que beneficiarán a la comunidad. Este análisis provee información esencial para apoyar a los gobernantes en la toma de decisiones en la gestión del recurso hídrico y, de esta forma, mejorar la calidad de vida de los pobladores de esta región del país.

## 2. Materiales y métodos

### 2.1 Área de estudio

El departamento del Cesar se encuentra localizado en la zona noreste del país. Limita al norte con los departamentos de La Guajira y del Magdalena; al sur con los departamentos de Bolívar y Norte de Santander, y al oriente con Norte de Santander y Venezuela. Cesar es el departamento del Caribe que tiene la más alta temperatura promedio anual ( $29,10^{\circ}\text{C}$ ), igualmente, su precipitación promedio anual es ligeramente inferior a la media de la región.

La investigación se realizó en los municipios de Agustín Codazzi, Astrea, Becerril, Bosconia, Chimichagua, Chiriguana, Curumaní, El Paso y La Jagua de Ibirico (figura 1), los cuales pertenecen a la zona media del departamento de Cesar, tienen un área total de  $9074,72\text{ km}^2$  y su altitud oscila entre 49 y  $3000\text{ m.s.n.m.}$  La zona de estudio se considera megadiversa debido a su variada conformación fisiográfica: en sus distintos pisos altitudinales se encuentran varias unidades climáticas, entre las cuales predomina cálido semiárido, cálido húmedo y, cerca de la frontera con Venezuela, templado húmedo y frío húmedo (Corpocesar, 2019).



**Figura 1.** Mapa del área de estudio.

**Fuente:** elaboración propia.

## 2.2 Recolección de datos

### 2.2.1 Información geológica

La cartografía geológica se buscó en el Geoportal del Servicio Geológico Colombiano, a escala 1:100 000, con el fin de construir una tabla que permitiera identificar cada formación geológica y el tipo de suelo (arena, grava, arcilla, etc.) del que está compuesta. Teniendo en cuenta lo anterior, se hizo una revisión bibliográfica para conocer el coeficiente K de permeabilidad de cada uno de los componentes litológicos presentes. El mapa de permeabilidad se elaboró a partir de la información del libro *El terreno*, en el cual González (2001) plantea un rango de coeficiente K que empieza en un orden de 102 cm/s hasta 10-11 cm/s, dependiendo del tipo de suelo, y los clasifica desde suelos muy permeables hasta suelos impermeables.

Asimismo, el mapa de textura de suelos se basó en la relación que existe entre la permeabilidad y la textura de suelos (Loyola *et al.*, 2015), de acuerdo con la cual un suelo de baja permeabilidad tiene características de franco arcilloso y un suelo muy permeable de arena gruesa o grava. Finalmente, el mapa de usos de suelos se realizó con los datos abiertos del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) del departamento del Cesar a escala 1:100 000, al cual se le realizó el corte de la zona de estudio; esto mismo se hizo para la curvas de nivel y las fallas geográficas.

### 2.2.2 Información hidrometeorológica

La información hidrometeorológica se sistematizó en una base de datos a partir de información cuantificada de un período de veinte años de las 33 estaciones de monitoreo del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam) que se encuentran activas en la zona. Se consideraron las variables de precipitación, caudales, temperatura (para esas variables se tuvo en cuenta los valores máximos, mínimos y medios), brillo solar, evaporación y humedad.

Posteriormente, se depuró la información complementando los datos faltantes para series temporales con el método de razón normal. Después se calculó el promedio anual de cada variable hidrometeorológica para cada uno de los veinte años que se consideraron en el estudio, con el fin de buscar el período multianual de cada estación y ponderar cada variable para obtener los valores de las ecuaciones de evapotranspiración potencial y real, las ecuaciones de Hargreaves, modificada para Colombia, y Budyko y Zubenok (1974), respectivamente (ecuaciones 1 y 2):

$$ETP = 0,00216E_0(T_{med} + 17,78)(T_{max} - T_{min})^{0,47} \quad \text{Ecuación 1}$$

$$ETR = \sqrt[2]{\left(ETP * P * \tanh\left(\frac{P}{ETP}\right) \left(1 - \cosh\left(\frac{P}{ETP}\right) + \sinh\left(\frac{ETP}{P}\right)\right)\right)} \quad \text{Ecuación 2}$$

La escorrentía se determinó con las series de caudales medios transformados a escorrentías usando la relación caudal-área (Ideam, 2018). Por ende, se utiliza el mismo valor del caudal medio multianual en el período estudiado para implementar esta variable en el balance hídrico.

Luego de realizar estas operaciones, se resolvió la ecuación de balance hídrico (ecuación 3) (Ocampo, 2012), cuyo resultado se utilizó para calcular la oferta hídrica superficial, que equivale al volumen de agua continental de los sistemas de drenaje superficial en un período determinado.

$$\frac{dS(t)}{dt} = P(t) - E(t) - R(t) \quad \text{Ecuación 3}$$

#### 2.2.4 Generación de mapas

Los mapas se elaboraron con la cartografía de la zona de estudio disponible en el IGAC y en Ingeominas a escala 1:100 000 (los más precisos que se encontraron para la zona). Mediante el uso de sistemas de información geográfica (SIG), se generaron *shapes* de cada variable utilizada para evaluar las zonas potenciales para la recarga de acuíferos. Asimismo, se ejecutaron densidades de fracturamiento, precipitación, geológico, permeabilidad, densidad de drenajes, uso de suelos y litología.

El mapa de densidades, tanto el de fracturamiento como el de drenajes, se realizó utilizando la herramienta de densidad de línea en ArcGis. Al respecto, se debe destacar que para la densidad de fracturamiento se tuvo en cuenta los parámetros establecidos por el Servicio Geológico Colombiano en el año 2016, según los cuales para generar mapas a escala 1:100 000 se utiliza un tamaño de píxel de 250 metros y un radio de 1 250 metros. El mapa de precipitación se obtuvo luego de calcular la precipitación media anual por estación durante un período de veinte años (2000-2020). El mapa de uso de suelos fue elaborado por el IGAC y recategorizado en el proceso.

Específicamente, para identificar y delimitar las zonas de recarga y flujos regionales del sistema hidrogeológico se aplicó el análisis jerárquico ponderado (AHP) (Escobar *et al.*, 2017) al conjunto de variables que se consideraron fundamentales en distintos órdenes de importancia y que condicionan el ingreso y movimiento del agua al subsuelo.

La demarcación de las áreas de mayor potencial de agua subterránea de la zona media del departamento del Cesar se basó en los elementos o actividades que se consideran con mayor potencial para la recarga desde fuentes superficiales y flujos regionales. Por lo tanto, se integraron los mapas temáticos (densidad de fracturamiento, densidad de drenaje, uso del suelo/cobertura del suelo, precipitación y permeabilidad), utilizando la herramienta de ArcMap para superponer las diferentes capas, después de considerar la evaluación de peso (Souissi *et al.*, 2018).

### 3. Resultados y discusión

#### 3.1 Hidrometeorología

Se analizó la información hidrometeorológica de la zona de estudio proveniente de 33 estaciones de monitoreo del Ideam que se encuentran activas en el área. Esto dio como resultado valores multianuales de precipitación de 89,29 mm, temperatura media de 29,29 °C, máxima de 38,29 °C y mínima de 22,23 °C. A su vez, se obtuvo un valor de radiación extraterrestre expresada en evaporación equivalente de 142,37 mm.

Con el fin de realizar el balance hídrico del área de estudio, se aplicaron las ecuaciones 2 y 3, cuyos resultados se reemplazaron para resolver la ecuación de balance hídrico (ecuación 4). Estos cálculos arrojaron una evapotranspiración (ETP) de 53,37 mm y una evapotranspiración real (ETR) de 44,70 mm. Respecto a la escorrentía superficial, su valor corresponde a 22,20 mm/año. Con base en esta información se determinó que la concentración de la zona de estudio es de 22,38 con signo positivo, lo cual significa que hay reposición de humedad en el suelo (Alarcón & Díaz, 2018).

En cuanto a las precipitaciones del área de estudio, se observó que son directamente proporcionales a la fisiografía de la zona. Las precipitaciones máximas se presentan donde se encuentran cuerpos de agua (ciénagas) y cerca de la zona montañosa, la cual aumenta con la altitud; la lluvia tiende a ser más importante en las proximidades de las costas. Los sistemas nubosos se consumen a medida que avanzan hacia el interior de los continentes (por abandono progresivo de su humedad bajo forma de lluvia) y las precipitaciones decrecen (Vich, 1996). En la figura 2 se muestran las concentraciones de lluvias para un período de veinte años.

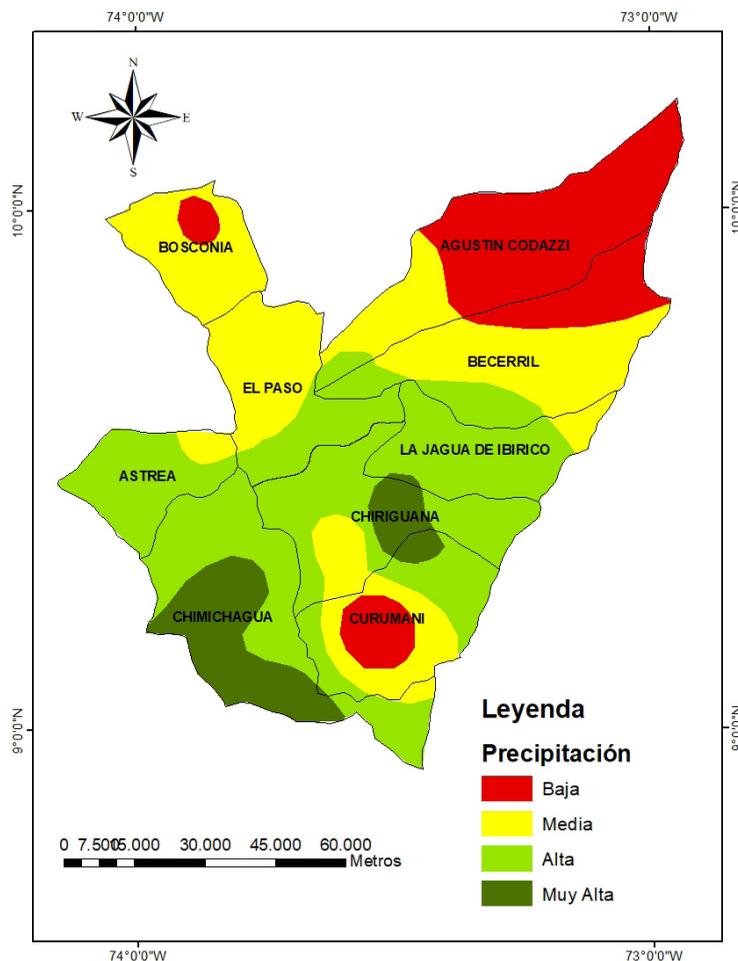


Figura 2. Mapa de precipitaciones.

Fuente: elaboración propia.

### 3.2 Textura de suelo y permeabilidad

Al realizar la clasificación de permeabilidad se tuvo en cuenta el rango de valores propuestos por González (2001), a partir de los cuales se obtuvieron cinco clases diferentes de permeabilidad. Asimismo, estas fueron utilizadas para clasificar la textura del suelo de acuerdo con la comparación que hacen Loyola *et al.* (2015) (figura 3).

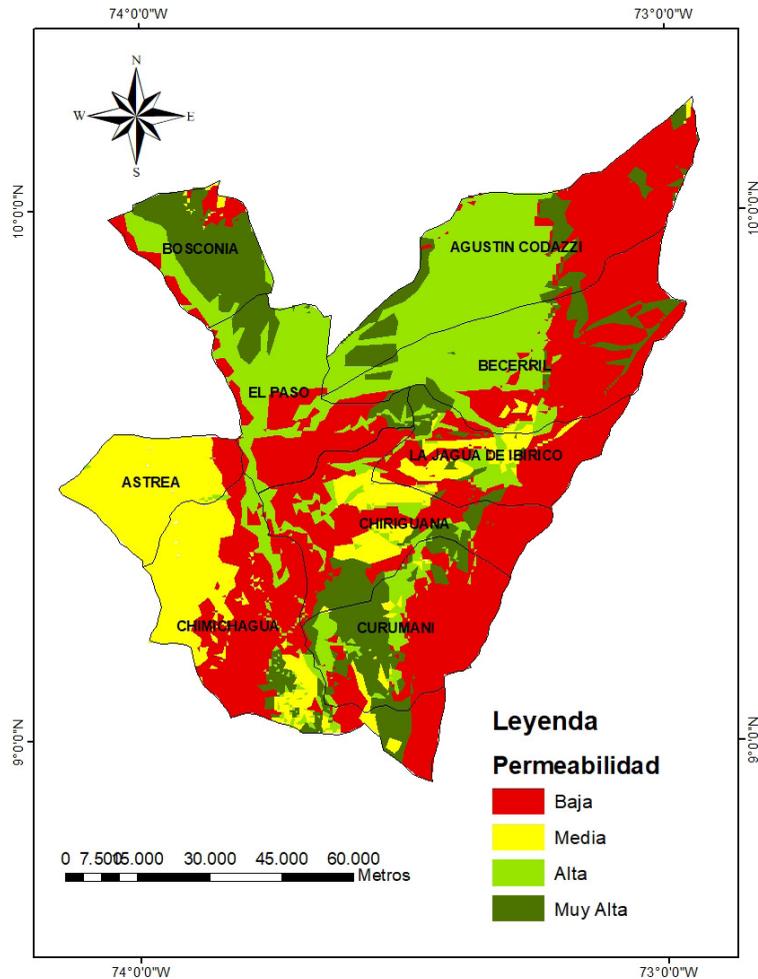
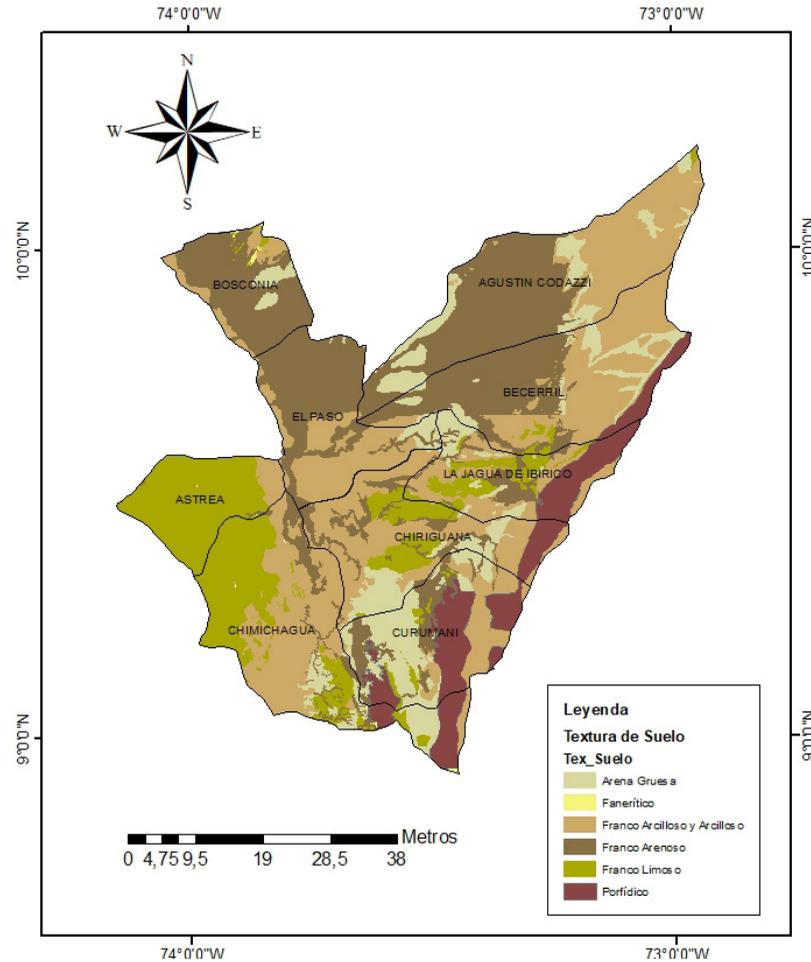


Figura 3. Mapa de permeabilidad de suelos.

Fuente: elaboración propia.

La textura del suelo (figura 4) desempeña un papel importante en la recarga de acuíferos, ya que la velocidad de infiltración, la percolación y la permeabilidad del suelo dependen del tamaño y el número de poros. La zona media del departamento del Cesar tiene una extensión significativa de suelo franco arcilloso y arcilloso, que se caracterizan por ser suelos finos, es decir, que presentan una velocidad de infiltración muy baja (0,05-0,8 cm/hora), de acuerdo con la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO).



**Figura 4.** Mapa de textura de suelos.  
Fuente: elaboración propia.

### 3.3 Uso de suelo

Las áreas geográficas bajo cuerpos de agua, agricultura y bosque o vegetación tienen un mayor potencial de recarga de agua subterránea que los asentamientos o áreas impermeables y el área debajo de terrenos baldíos (Kaur *et al.*, 2020). Por lo tanto, se asignó un peso alto al área debajo de los cuerpos de agua y el peso mínimo al área debajo de las superficies impermeables (figura 5).

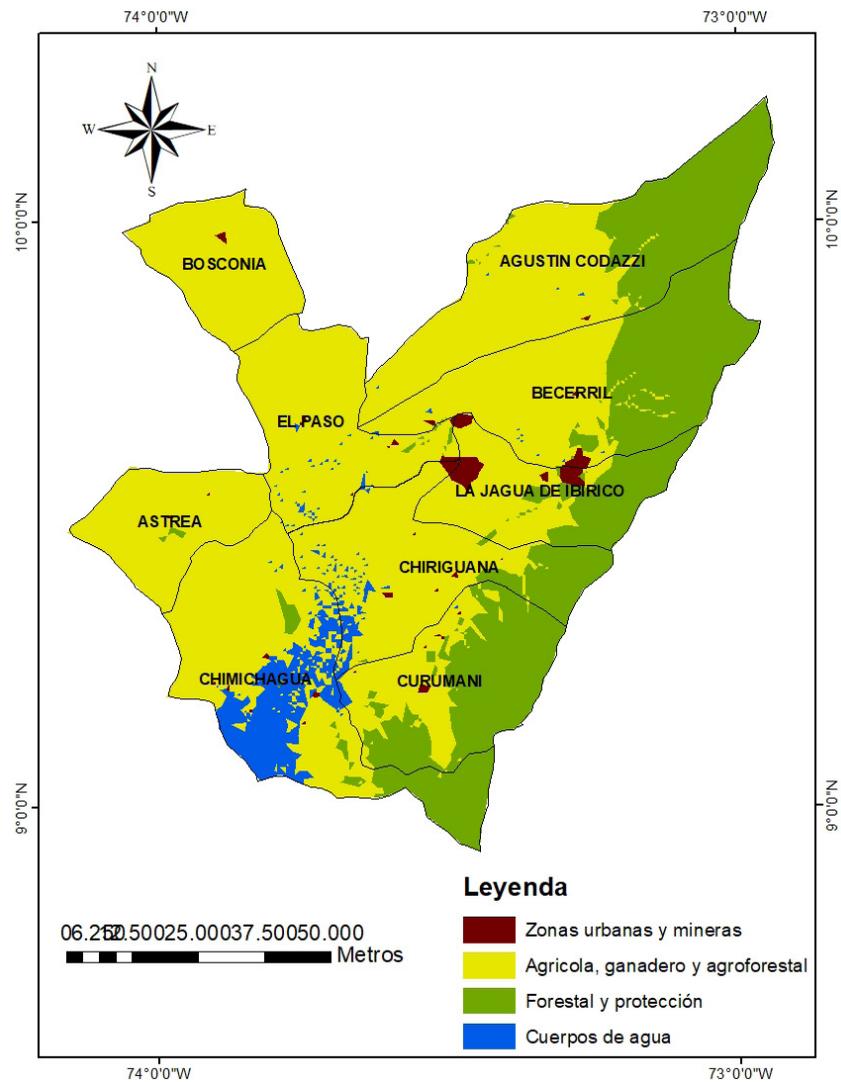


Figura 5. Mapa de usos de suelos.

Fuente: elaboración propia.

### 2.3.4 Densidad de drenaje

Según Prasad *et al.* (2007), a mayor densidad de drenaje se produce una escorrentía más fuerte, y a menor, aumenta la capacidad de infiltración del suelo (figura 6). Por lo tanto, cuanto menor sea la densidad de drenaje, mayor es la probabilidad de recarga potencial de la zona (figura 6).

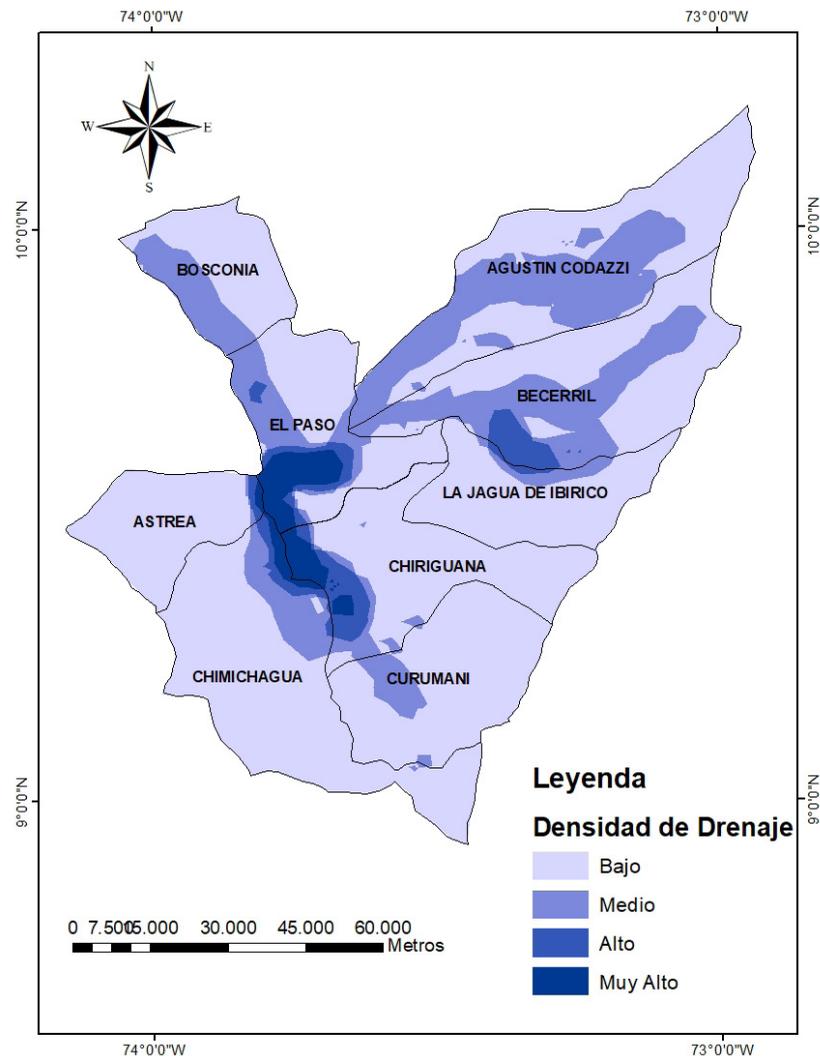
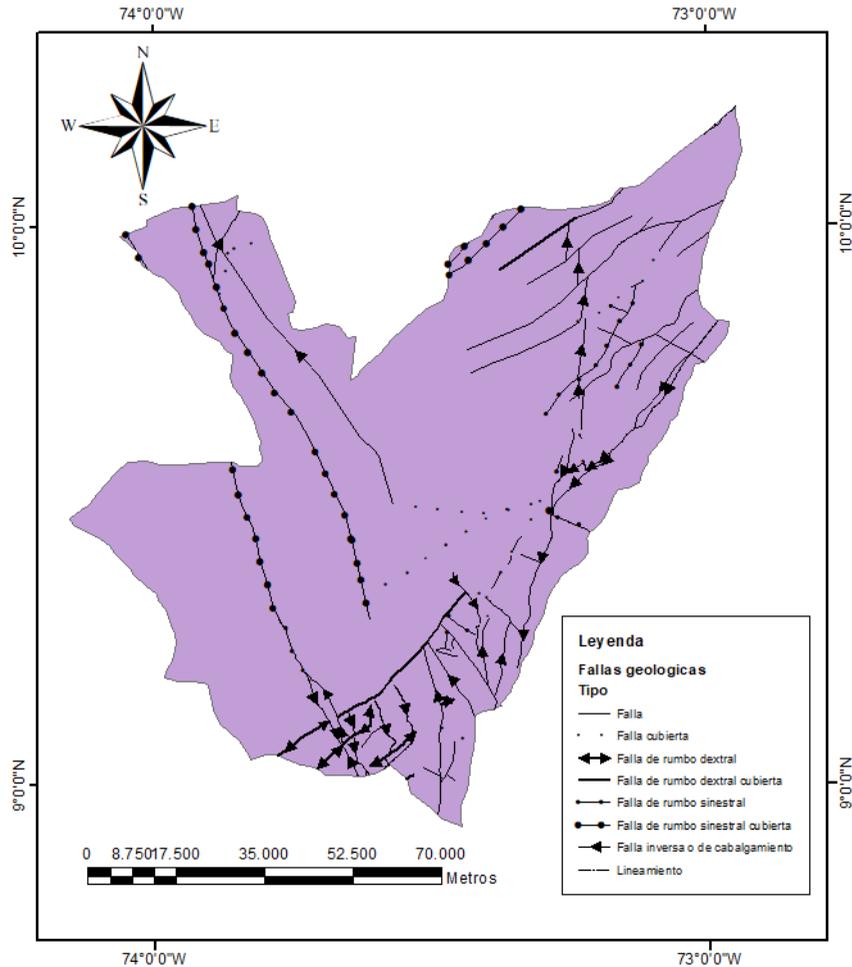


Figura 6. Mapa de densidad de drenaje.

Fuente: elaboración propia.

### 3.5 Fallas geológicas

En la zona media del departamento del Cesar se encuentran ubicadas diversas fallas, principalmente hacia la región sureste (figura 7). Entre ellas se distinguen ocho diferentes tipos: fallas, fallas cubiertas, fallas de rumbo dextral, fallas de rumbo sinistral, fallas inversas o de cabalgamiento y lineamiento.



**Figura 7.** Mapa de fallas geológicas.

Fuente: elaboración propia.

### 3.6 Densidad de fallas

Un lineamiento puede definirse como una característica lineal de la superficie, que está relacionada con fallas o fracturas. De esta forma, zonas con mayor densidad de lineamientos poseen un mayor grado de fracturamiento, y permiten una mayor infiltración del agua. A su vez, es importante precisar el tipo de fracturamiento que se encuentra en la zona y de esa manera saber si es más propenso a facilitar la recarga. Por lo tanto, con la información recolectada se puede afirmar que a mayor densidad de lineamientos existe mayor probabilidad de recarga potencial de aguas (figura 8).

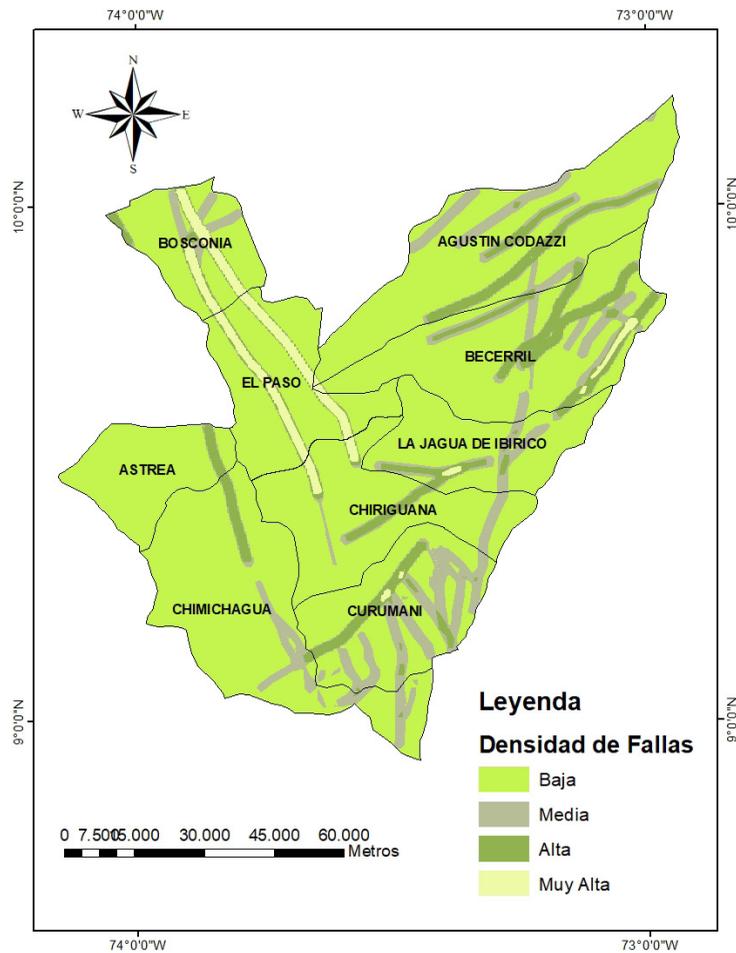


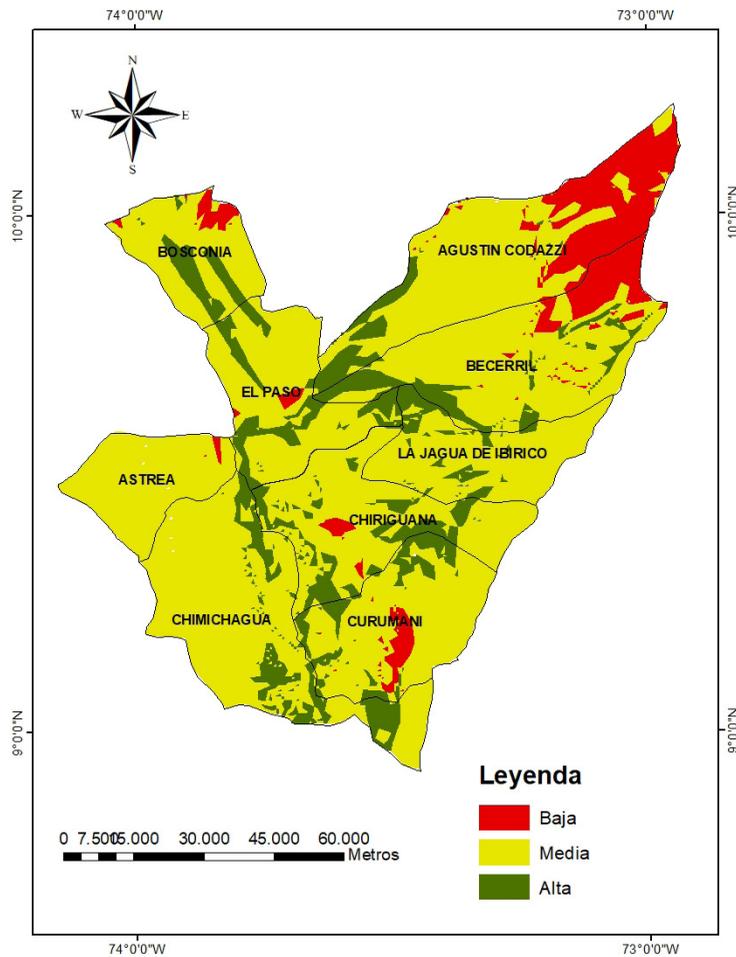
Figura 8. Mapa de densidad de fallas.

Fuente: elaboración propia.

### 3.7 Áreas potenciales de recarga

El área con mayor potencial de recarga de agua subterránea se asignó teniendo en cuenta el conjunto de variables que se consideraron fundamentales en distintos órdenes de importancia. Con este criterio, se establecieron cuatro clases e indicadores: muy alta, alta, media y baja, para cada uno de los factores en la evaluación de flujos regionales y superficiales. Dependiendo de la variable y su indicador y/o clase, se le asignó un porcentaje de influencia en la recarga de acuíferos: 20% para la densidad de drenaje, 30% para precipitación, 30% para permeabilidad del suelo, 10% para densidad de fallas y 10% para tipo de suelo.

Una vez se superpusieron las capas (Densidad de drenaje, Precipitación, Permeabilidad del suelo, Densidad de fallas y Tipo de suelo), se generó el mapa de zonas óptimas de recarga de acuíferos, clasificadas en tres clases: alta, media y baja. El *software* genera estas tres categorías porque identifica un umbral en los criterios iniciales, de manera que interpreta que no hay juicios para categorizar zonas de muy alta probabilidad de que se genere el proceso de recarga (figura 9).



**Figura 9.** Mapa de zonas óptimas de recarga de acuíferos.

**Fuente:** elaboración propia.

Como resultado de este proceso se identificaron las principales zonas de recarga de acuíferos, la cual se presenta de forma distribuida por toda el área de estudio. En la parte norte (Bosconia, Becerril, El Paso y Agustín Codazzi) se encontró una alta probabilidad de recarga de agua subterránea, pues este sector tiene una alta presencia de precipitaciones, una permeabilidad alta y muy alta, además de que cuenta con propiedades de alta densidad de drenaje y fracturamiento. En la zona sur (Astrea, Chimichagua y Curumani), a pesar de que presenta una permeabilidad baja y un suelo franco arcilloso, tiene áreas que sí cumplen con las características para una recarga media, ya que la densidad de drenaje es baja y el fracturamiento es medio.

En el este de la zona de estudio (La Jagua de Ibirico y Chiriguana) se refleja la presencia de cobertura vegetal y estructuras montañosas, con fallas de densidad media, pero con poca densidad de drenaje y con una textura de suelo porfídico y franco arcilloso. Estas características hacen que la permeabilidad del suelo sea insuficiente y, por lo tanto, que tenga una infiltración media, de modo que en esta zona la recarga de acuíferos es baja.

## 4. Conclusiones

La diversidad de suelos de esta región del país hace que la recarga de acuíferos sea sectorizada, debido a la importancia que tiene la infiltración, la porosidad y la permeabilidad que los caracterizan. Recordemos que existen diferentes texturas de suelo en la zona de estudio (arcilloso, limoso, arenoso), sin contar con la presencia de suelos piroclásticos que dificultan el proceso de recarga.

Otro de los factores que desfavorecen la recarga natural de acuíferos en la zona media del departamento del Cesar es la alteración de los usos del suelo. Esto se debe a que la ganadería y la agricultura extensiva explotan el suelo destinado a la conservación de la capa vegetal, sin contar la deforestación que producen actividades extractivas como la minería. Con el paso del tiempo, este tipo de acciones deteriora el suelo y, a su vez, las propiedades naturales que este posee para la recarga de acuíferos. Este factor, junto con los demás expuestos en este artículo, hacen que la mayor parte de la zona de estudio presente una precarga media (figura 9).

Finalmente, el análisis de los factores estudiados permitió identificar las principales zonas de recarga y ubicar las de mayor tamaño y, en consecuencia, las de mayor relevancia en los municipios de Becerril, El Paso y Agustín Codazzi. De esta manera, el mapa que se obtuvo permitirá la toma adecuada de decisiones a corto, mediano y largo plazo con respecto al recurso hídrico. La información sobre la disponibilidad de agua de la región constituye un insumo valioso para orientar, planificar y gestionar la forma como se va a disponer del recurso, así como para realizar estudios más específicos en la zona.

## Agradecimientos

Nuestra gratitud a los profesores Douglas Quintero y Jorge Muñoz, de la Universidad Central, por su colaboración y dirección. Agradecemos especialmente a todas las personas que colaboraron para la culminación exitosa de este proyecto.

## Referencias

- Alarcón Africano, L., & Díaz Suescún, L. (2018). *Estudio hidrológico y balance hídrico para determinar la oferta y la demanda de agua de la cuenca de la quebrada Niscota para un acueducto interveredal en Nunchía, Casanare* [Trabajo de especialización, Universidad Católica de Colombia]. Repositorio Institucional. <https://bit.ly/3nEntIj>
- Anaya, J. E. (2018). El derecho humano al agua potable en Colombia: Decisiones del Estado y de los particulares. *Universitas*, 136, 1-10 <https://doi.org/10.11144/Javeriana.vj136.dhap>
- Budyko, M. I., & Zubenok, L. I. (1974). Methods of determining evaporation from the land surface. En Organización Meteorológica Mundial (Ed.), *Workshop of the water balance of Europe* (pp. 95-128). Unesco.
- Corporación Autónoma Regional del Cesar [Corpocesar]. (2006). *Aprovechamiento y protección del agua subterránea en las ecorregiones de los valles de los ríos Cesar y*

- Magdalena, Departamento del Cesar. Corpocesar; Ideam. <https://www.corpocesar.gov.co/files/Informe%20zona%20centro.pdf>
- Corporación Autónoma Regional del Cesar [Corpocesar]. (2019). *Plan de Gestión Ambiental Regional PGAR / PLANEAR 2019-2040*. Corpocesar. <https://www.corpocesar.gov.co/files/PGAR-2019-2040.pdf>
- Escobar, J. Betancur, T., García, E. Martínez, C., & Palacio, P. (2017). Análisis jerárquico ponderado aplicado a la identificación de recarga y flujos regionales en acuíferos. <https://revistas.elpoli.edu.co/index.php/pol/article/view/1089/1519>
- González, M. (2001). *El Terreno*. Ediciones UPC.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [Ideam]. (2018). *Reporte de avance del Estudio Nacional del agua 2018*. Minambiente; Ideam. [http://www.andi.com.co/Uploads/Cartilla\\_ENA\\_%202018.pdf](http://www.andi.com.co/Uploads/Cartilla_ENA_%202018.pdf)
- Kaur, L., Rishi, M. S., Singh, G., & Nath Thakur, S. (2020). Groundwater potential assessment of an alluvial aquifer in Yamuna sub-basin (Panipat region) using remote sensing and GIS techniques in conjunction with analytical hierarchy process (AHP) and catastrophe theory (CT). *Ecological Indicators*, 110, Article 105850. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105850>
- Loyola Gómez, C., Rivas Maldonado, J., & Gacitúa Rojas, M. J. (2015). Permeabilidad del suelo de la cuenca del río Chillán, entre Estero Peladillas y río Ñuble, Chile. *Cuadernos de Geografía*, 24(1), 73-86. <http://doi.org/10.15446/rcdg.v24n1.41679>
- Ocampo, O. (2012). *Análisis de vulnerabilidad de la cuenca del río Chinchiná para condiciones estacionarias y de cambio climático* [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia]. Repositorio UN. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/9268>
- Prasad, R. K., Mondal, N. C., Banerjee, P., Nandakumar, M.V., & Singh, V.S. (2007). Deciphering potential groundwater zone in hard rock through the application of GIS. *Environmental Geology*, 55, 467-475. <https://doi.org/10.1007/s00254-007-0992-3>
- Programa Mundial de la Unesco de Evaluación de los Recursos Hídricos. (2006). *El agua: Una responsabilidad compartida: 2° informe de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos en el mundo*. Unesco. [https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000144409\\_spa](https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000144409_spa)
- Souissi, D., Haythem Msaddek, M., Zouhri, L., Chenini, I., El May, M., & Dlla, M. (2018). Mapping groundwater recharge potential zones in arid region using GIS and Landsat approaches, southeast Tunisia. *Hydrological Sciences Journal*, 63(2), 251-268. <https://doi.org/10.1080/02626667.2017.1414383>
- Vich, A. I. J. (1996). *Aguas continentales: Formas y procesos*. Centro de Economía, Legislación y Administración del Agua y el Ambiente. <https://bit.ly/3yjAwnr>
- Zamudio Rodríguez, C. (2012). Gobernabilidad sobre el recurso hídrico en Colombia: Entre avances y retos. *Gestión y Ambiente*, 15(3), 99-112. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/gestion/article/view/36284/42930>

# Impacto potencial de la minería subterránea de carbón en los acuíferos del municipio de Suesca, Cundinamarca: modelo numérico

Potential impact of underground coal mining in the aquifers of the municipality of Suesca, Cundinamarca: a numerical model

Marlyn Adriana García Gutiérrez<sup>\*</sup>, Natalia Viviana Hernández Perdomo<sup>\*\*</sup> y Douglas Quintero<sup>\*\*\*</sup>

---

---

## Cómo citar

García Gutiérrez, M. A., Hernández Perdomo, N. V., & Quintero, D. (2020). Impacto potencial de la minería subterránea de carbón en los acuíferos del municipio de Suesca, Cundinamarca: modelo numérico. *Ingeciencia*, 5, 125-142.

\* Ingeniera ambiental, Universidad Central. Correo: mgarciag3@ucentral.edu.co  
\*\* Ingeniera Ambiental, Universidad Central. Correo: nhernandezp@ucentral.edu.co  
\*\*\* Geólogo, Msc. en Hidrogeología, profesor e investigador del Departamento de Ingeniería Ambiental, Facultad de Ingeniería y Ciencias Básicas, Universidad Central. Correo: dqinteror@ucentral.edu.co

## Resumen

El municipio de Suesca, Cundinamarca, de vocación minera, pero con un nivel técnico muy rudimentario, enfrenta hace décadas un problema por la mala disposición de los drenajes ácidos de mina (DAM). Este trabajo evalúa la trayectoria de los DAM desde una mina abandonada hacia los acuíferos del municipio, mediante un modelo numérico y el *software* Modflow. En primer lugar, se hizo el reconocimiento de los sistemas acuíferos para determinar la calidad del agua subterránea y los parámetros hidráulicos, con base en la información de los pozos y manantiales. Luego se definió el modelo numérico en términos de las propiedades hidrogeológicas, limitado a un área de 16,94 km<sup>2</sup> y a tres capas, según las unidades identificadas por un perfil estratigráfico. Se demuestra que los sulfatos resultantes de la oxidación de la pirita en superficie tienen la capacidad de percolar hacia el subsuelo a través de mecanismos advectivos y dispersivos. Así, en un período de 20 años superan los 100 m de profundidad y más de 60 m de longitud, lo cual altera negativamente la calidad de las aguas subterráneas.

**Palabras clave:** acuíferos, drenaje ácido de minas (DAM), hidrogeología, modelo numérico, pirita.

---

## Abstract

The municipality of Suesca, Cundinamarca has faced for decades a problem associated with the poor disposal of the Acid Mine Drainage (AMD's). This has been a territory with a mining vocation. However, its level of technicality is very rudimentary. Therefore, this work evaluates, through a numerical model, the trajectory of the DAM from an abandoned mine to the aquifers of the municipality, using the Modflow software. It was started from the recognition of the aquifer systems, to achieve the determination of the quality of the underground water and the hydraulic parameters, based on information provided by wells and springs. Finally, the numerical model was defined in terms of the hydrogeological properties, delimited by an area of 16.94 km<sup>2</sup> and made up of three layers according to the units identified by a stratigraphic profile. The results show that the sulfates resulting from the oxidation of Pyrite on the surface, have the ability to percolate towards the subsoil through advective and dispersive mechanisms. Thus, in a period of 20 years they exceed 100 m in depth and more than 60 m longitudinally, negatively altering the quality of groundwater.

**Keywords:** acid mine drainage (AMD), aquifers, hydrogeological, numerical model, pyrite.

## 1. Introducción

Las aguas subterráneas (AS) tienen gran importancia ambiental porque prestan servicios ecosistémicos relacionados con la preservación de las cuencas hidrográficas y son parte fundamental del gran ciclo hidrológico (USGS, 2019). En Cundinamarca, esta situación se presenta en la cuenca alta del río Bogotá y otras zonas de interés, que constituyen el área de estudio de este trabajo.

Existen múltiples fuentes de contaminación de las AS en esta región, entre las cuales las más comunes son los agroquímicos y la disposición de residuos sólidos ordinarios, pero también se han identificado las provenientes de actividades mineras, con características variadas y muy persistentes. La contaminación en superficie del terreno es la forma más común como ingresan estas sustancias a las AS. Particularmente, los vertidos de drenajes ácidos mineros (DAM) con remanentes de sulfatos y metales pesados atraviesan el suelo y la zona no saturada (ZNS) del acuífero, de manera que se bioacumula y compromete las posibilidades de mitigación (Moradell & Renau-Pruñonosa, 2019).

Esta problemática, junto con el acelerado crecimiento poblacional y al auge de la actividad minera en la región de Cundinamarca, causan graves impactos que limitan la oferta ambiental debido a la alteración en las trayectorias de flujo, las variaciones geoquímicas y las conexiones hidrogeológicas (Pérez, 2013).

A pesar de esto, en Colombia no se han hecho grandes esfuerzos por estudiar su comportamiento. De ahí que los mayores aportes de información se encuentren en el ámbito internacional. En Alemania, por ejemplo, el modelado de los acuíferos afectados por descargas de minas de lignito demostró serias afectaciones por la oxidación de la piritita (Lenk & Wisotzky, 2011). Asimismo, resulta relevante la investigación de la Agencia de Consultores Australianos de Aguas Subterráneas y Ambientales, en la cual se describen las características hidrogeológicas del área de influencia de las minas, al tiempo que se evalúa el impacto de un proyecto minero a partir de un modelo numérico que identifica la conexión del acuífero con sistemas superficiales (Australasian Groundwater & Environmental [AGE], 2015). Por último, una investigación de la Universidad de Kentucky afirma que las operaciones mineras inducen movimientos en el suelo, alteran la conductividad hidráulica, disminuyen la carga hidráulica y modifican la trayectoria normal del agua. Este estudio también cuantificó las afectaciones aplicando un modelado hidrogeológico pre- y posminería de un caso de estudio real (Bode-Jiménez, 2017).

Aunque las condiciones hidrogeológicas de las investigaciones reseñadas difieren bastante de la zona de estudio de este trabajo, son una referencia importante para construir modelos numéricos, pues en este proceso es necesario contemplar varios escenarios para poner a prueba la capacidad del modelado (Muniruzzaman *et al.*, 2018). En ese orden de ideas, y enfatizando el contexto de los países suramericanos con abundantes recursos hídricos, se destaca la transfrontericidad de acuíferos que se extienden bajo dos o más países, de manera que tanto las extracciones como su mala gestión pueden agotar sus reservas o contaminarlas (González, 2013). Esto mismo sucede con los límites hidrogeológicos de esta investigación, los cuales se extienden en cinco municipios circundantes a Suesca.

En cuanto al contexto nacional, se debe señalar que el sector minero ha crecido exponencialmente (Romero, 2016), pero el industrial, en su afán de generar ganancias, ignora las consecuencias medioambientales. Por esta razón ha sido necesario caracterizar el

potencial contaminante del DAM y los residuos generados *in situ*. En ese sentido, en la publicación de Pérez (2013) se analizan las direcciones de flujo, los niveles freáticos y los cambios geoquímicos. Por su parte, Guerrero (2014) analiza la insostenibilidad intrínseca de esta actividad, de la cual se habla poco y se mantienen licencias a cambio del “desarrollo” regional. Sin embargo, Guerrero (2014) plantea la posibilidad de hacerla sostenible mediante la aplicación de modelos matemáticos.

Para finalizar, en la región se destaca la investigación de Villamil *et al.* (2018) en Guachetá (Cundinamarca), municipio que se caracteriza por desarrollar pequeña minería carente de tecnología y sin planes de manejo ambiental. El estudio evidencia que el agua de mina con elevadas concentraciones de hierro y sulfato es vertida directamente a los ríos, lo cual afecta el agua, el suelo y su productividad agrícola (Villamil *et al.*, 2018).

En este sentido, los problemas ambientales reportados, los vacíos de información y las percepciones superficiales sobre el medio ambiente hacen necesario evaluar el impacto de esta actividad en la calidad de los acuíferos del municipio de Suesca. Con este propósito, en este trabajo se aplicó la herramienta de modelado Modflow para responder la siguiente pregunta de investigación: ¿Cómo afecta a los acuíferos el vertimiento de los DAM? Específicamente, en el artículo se identifican y caracterizan los sistemas acuíferos, así como las unidades hidrogeológicas del área de influencia, para definir un modelo numérico de flujo en los acuíferos. Los resultados constituyen una contribución de la academia que sienta las bases para realizar estudios posteriores e incentivar el uso responsable de los acuíferos.

## 2. Materiales y métodos

### 2.1 Determinación del área de influencia

El área de influencia indirecta del estudio se encuentra en el oeste de Suesca y parte de municipios circundantes, ya que los límites político-administrativos no coinciden con los de las formaciones del subsuelo y requieren un análisis conjunto. Partiendo de esto, se estableció un área a modelar de 16,94 km<sup>2</sup> (figura 1), determinada por el sinclinal de Checua y la falla de Cucunubá, que limita con la zona de disposición de estériles de la mina San Cayetano. Igualmente, se identifica la dinámica del área que abarca superficialmente la Formación Labor y Tierna, escogida por su gran importancia hidrogeológica.



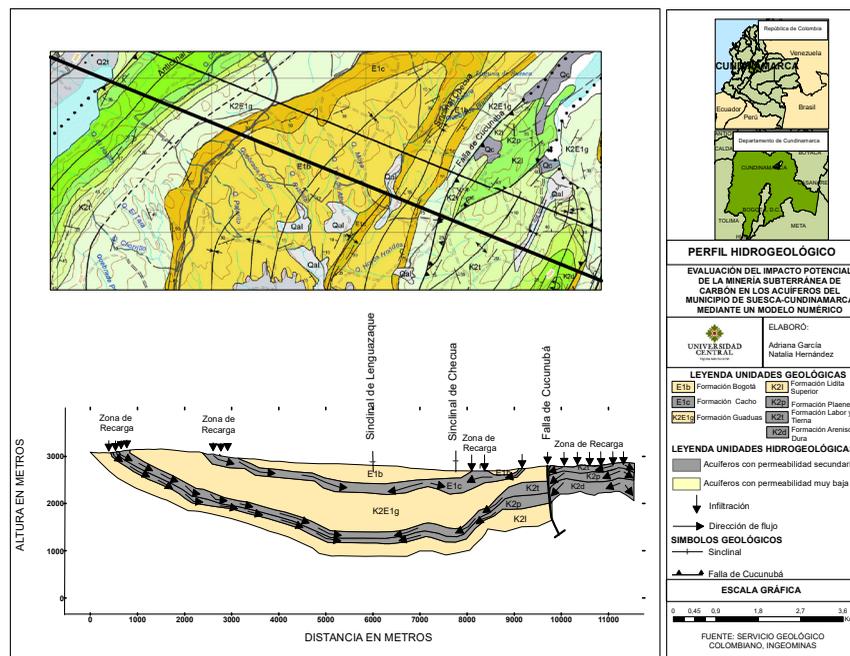


Figura 2. Perfil hidrogeológico área de influencia indirecta.

Fuente: elaboración propia con base en Plancha 209 SGC (Montoya & Reyes, 2003).

Asimismo, un análisis de veinte pozos del acuífero Guadalupe evidenció que predomina un ambiente con aproximadamente  $12,15 \text{ mg/L}$  de  $\text{Mn}^{+2}$ ,  $\text{Fe}^{+2}$ ,  $\text{SO}_4^{-2}$  y  $\text{Mg}^{+2}$ , además de  $\text{Ca}^{+2}$  con  $29\,166 \text{ mg/L}$  (Castrillón *et al.*, 2001). Según la normativa ambiental, concerniente y vigente, estos valores deberían ser iguales o menores a  $0,043 \text{ mg/L}$  para el manganeso,  $2 \text{ mg/L}$  para el hierro,  $1200 \text{ mg/L}$  para los sulfatos y  $0,002 \text{ mg/L}$  para el calcio. Así pues, las concentraciones superan considerablemente los límites máximos permisibles, con excepción de los sulfatos.

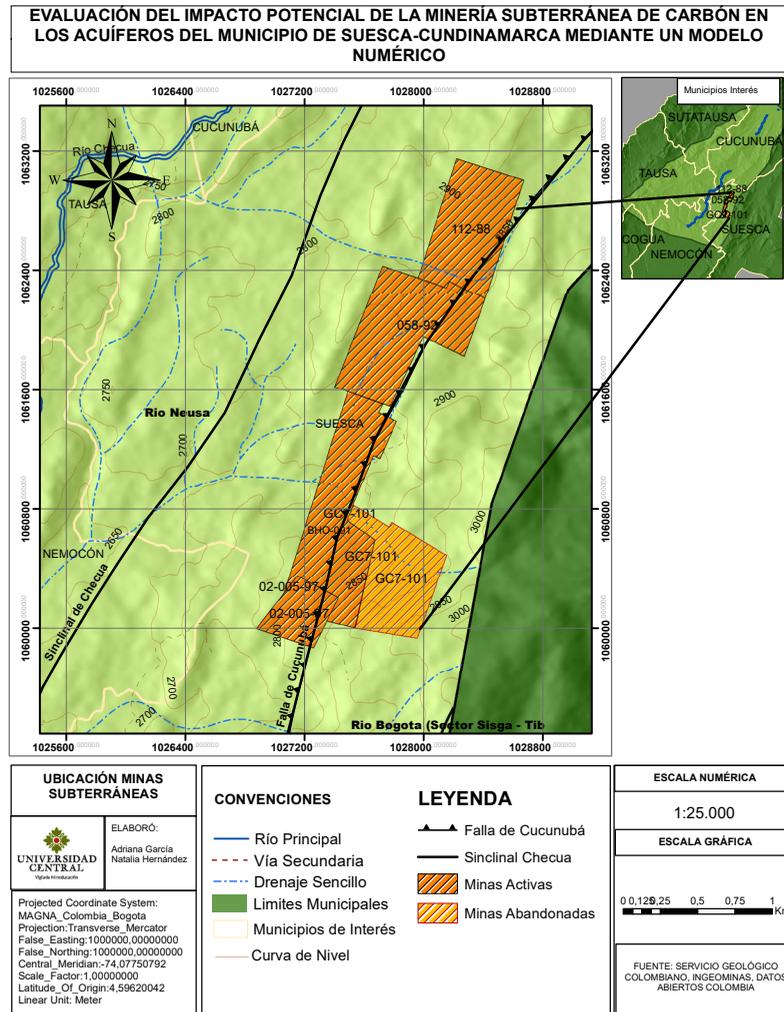
Esto supone, desde luego, una serie de afectaciones ambientales y sanitarias. Por una parte, el hierro y el manganeso, compuestos comunes del medio, representan un problema en las AS al estar ligados a inconvenientes operacionales y estéticos. Por otra, en concentraciones como las mencionadas, el hierro puede causar afectaciones a la salud como depresión, fallas respiratorias y problemas cardiacos. De manera similar, el manganeso afecta el tracto respiratorio y el cerebro. Ahora bien, en relación con las afectaciones ambientales de estos dos compuestos, se identifican las incrustaciones en tuberías, aumento de la turbiedad del agua y, por ende, la acentuación de riesgos microbiológicos (Burbano & Sánchez, s. f.).

Respecto a las concentraciones de sulfato identificadas, cabe señalar que si bien no superan los límites permisibles, si se superara dicha concentración, sus afectaciones a la salud generarían principalmente un efecto laxante y, consecuentemente, deshidratación severa. También cabe mencionar que los límites máximos permisibles establecidos en Colombia son muy elevados en comparación con otros países, como Costa Rica, donde los valores máximos para sulfatos son del orden de  $25 \text{ mg/L}$ , dado que es la concentración que asegura una calidad aceptable para el consumo (Bolaños-Alfaro *et al.*, 2017).

Por último, las concentraciones de magnesio y calcio, asociadas a la dureza del agua, no representan efectos directos sobre la salud, aunque algunos estudios han sugerido, por una parte, enfermedades cardiovasculares en poblaciones asentadas en áreas donde el consumo de aguas blandas es mayor, y, por otra, la facilidad que tienen para disolver metales y producir intoxicación. Naturalmente, y tal como lo muestran los valores obtenidos, el calcio se encuentra en las aguas en cantidades mucho mayores que el magnesio.

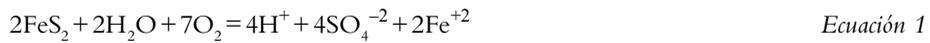
### 2.3 Minería de carbón en Suesca

En el oeste de Suesca se ubica el sinclinal de Checua-Lenguazaque sobre la formación Guaduas, constituida por una serie de niveles, entre los cuales se destacan Ktg2 y Ktg3 debido a la presencia de mantos de carbón. En consecuencia, se han otorgado concesiones para la extracción de carbón (CAR, 2014) (figura 3, tonalidades naranja). Las reservas son turba, lignito y bituminoso (Ministerio de Minas y Energía, 2012).

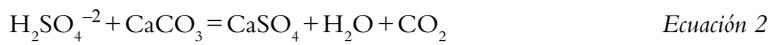


**Figura 3.** Ubicación de las minas subterráneas de carbón.  
Fuente: elaboración propia con base en Plancha 209 SGC (Montoya & Reyes, 2003) y expedientes CAR.

Desde la puesta en marcha de la extracción de carbón se tiene contacto con depósitos de AS. El agua se contamina por la disolución de compuestos solubles de las rocas y tiene cambios de pH a causa de la oxidación de la pirita ( $\text{FeS}_2$ ) alojada en los mantos de carbón. Cuando se oxida, la pirita forma sulfatos y libera metales pesados (Espinosa *et al.*, 2010). Los sulfuros reaccionan (ecuación 1) cuando entran en contacto con agua y oxígeno.



En este punto, el agua cuenta con una carga contaminante, de manera que el ion ferroso puede oxidarse y formar ion férrico o precipitar como hidróxido férrico. La reacción completa de la pirita está determinada por el tiempo. En este sentido, debido a que los DAM generados requieren evacuación del área de explotación, la mayoría de los concesionados realiza desagüe, decantación y neutralización química de aguas ácidas. La reacción resultante se especifica en la ecuación 2.



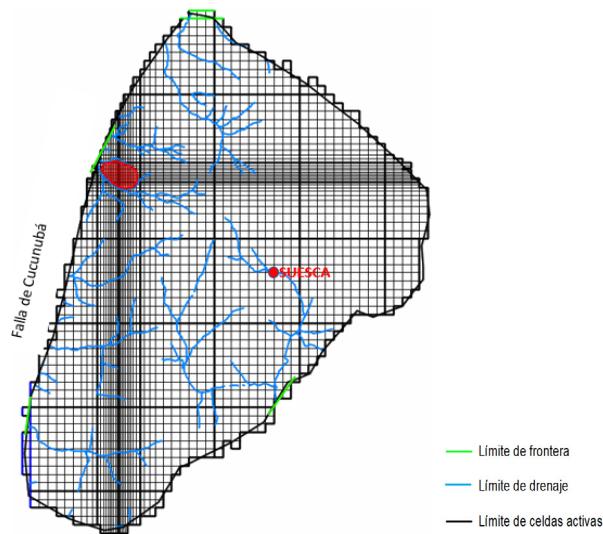
Sin embargo, dicho tratamiento no es el común denominador de todos los títulos mineros. Se detectó que, en la fase final, se separa el carbón de los estériles que contienen remanentes de pirita, óxido de silicio, alúmina y contenidos de azufre (Jiménez, 2015) y se depositan directamente sobre la cobertura vegetal, lo cual altera la calidad de los acuíferos.

## 2.4 Zonas de interés ambiental

Según los Informes de Seguimiento y Control, se hace evidente el hecho preocupante de que todas las minas se encuentran en el área de Reserva Forestal Protectora Productora (RFPP) de la cuenca alta del río Bogotá (CAR, 2006). Es decir, todos los títulos evaluados realizan sus actividades de forma ilegal, de manera que se ha exigido realizar su cierre definitivo. La mina San Cayetano (GC7-101) es un claro ejemplo, pues se encuentra abandonada y se espera el cumplimiento del Plan de Desmantelamiento y Abandono, que restituya las afectaciones ambientales generadas por la explotación.

## 2.5 Migración del modelo

Se desarrolló el modelo y la definición de la geometría de la mina San Cayetano empleando el paquete MT3DMS, con el cual se conoció la trayectoria de las partículas contaminantes a través de los acuíferos. Además se definió la grilla con el método *enclosed cells*. Esta zona se extiende a lo largo de las formaciones Labor y Tierna, Plaeners y Arenisca Dura. Igualmente, se configuró un arreglo de 67 filas y 54 columnas acotado por celdas activas de 100 m x 100 m (figura 4) precisas para la adecuada visualización del modelo a escala local. Aun así, la representación de la mina se discretiza en celdas de menor tamaño (20 m x 20 m) para obtener mayor detalle de la pluma contaminante.



**Figura 4.** Dimensiones del modelo en Modflow.  
Fuente: elaboración propia.

El declive generado por el anticlinal de Guachancia direcciona el flujo de AS hacia la falla de Cucunubá, considerada la barrera que limita el paso del contaminante hacia las formaciones aledañas. Los drenajes de las quebradas son el límite de frontera del polígono de interés.

Una vez definida la grilla, se ingresaron los datos hidrogeológicos de los tres acuíferos (tabla 1). Para mayor precisión, Labor y Tierna se discretizó en tres capas, Pleaners en dos y Arenisca Dura mantuvo su profundidad, representada por celdas inactivas.

**Tabla 1.** Parámetros hidrogeológicos de las formaciones que se modelan

Formación	Profundidad total (m)	Discretización (m)	Conductividad hidráulica K (m/día)	Recarga (mm/año)	Transmisividad (m <sup>2</sup> /día)	
Grupo Guadalupe	Labor y Tierna	177	C1: 59	1X10 <sup>-4</sup>	435	De 0 a 30
			C2: 59	1X10 <sup>-5</sup>		
			C3: 59	1X10 <sup>-6</sup>		
Pleaners	187	C1: 93,1	1X10 <sup>-7</sup>	359	De 1,5 a 10	
		C2: 93,1	1X10 <sup>-8</sup>			
Arenisca dura	227	227	1X10 <sup>-8</sup>	246	De 20 a 30	

Fuente: adaptada de Ingeominas (1993).

Además, se tuvo en cuenta la evapotranspiración con 839 mm/año (Ingeominas, 1993). La transmisividad también se contempló para cada formación. Pese a que no es el objetivo principal de esta investigación, se tomó un dato hipotético de 1200 mg/L de sulfatos, asumiendo el peor escenario de acuerdo con los límites máximos permisibles contemplados

en la Resolución 0631 de 2015 para la extracción de carbón de piedra y lignito, a fin de establecer las características de la pluma contaminante. Finalmente, y para entender mejor el potencial del DAM, se definieron dos escenarios de evaluación de impactos en el flujo, dirección y alcance del contaminante, en una escala temporal de cinco y veinte años.

### 3. Resultados y discusión

El agua de los manantiales se considera poco mineralizada, pues su concentración está por debajo de los niveles máximos permisibles establecidos por la Resolución 631 de 2015 para la actividad minera. No obstante, las condiciones del AS refieren un máximo de contenido en  $\text{Fe}^{+2}$  que se excede hasta superar los 12 mg/L, lo cual está relacionado, por una parte, con el DAM y su impacto negativo sobre los acuíferos debido a la capacidad que tiene para transportar y almacenar metales pesados. Por otra, se debe a las malas prácticas de extracción y manejo de desechos.

El modelo presentó un porcentaje de discrepancia de 0,00, lo cual indica que los valores obtenidos en el balance hídrico (tabla 2) convergen de acuerdo con los datos de entrada. Los niveles piezométricos no fueron determinantes al establecer la trayectoria de la pluma contaminante. En vista de la ausencia de datos reales de piezómetros, se estableció la capa de Labor y Tierna como punto más susceptible de acuerdo con su elevación y condiciones de permeabilidad. Así, se identificó que los pozos de medición de AS suelen ser escasos en el área de estudio, lo que puede generar incertidumbre y hace imposible calibrar el modelo. Es decir, se identifica una deficiencia en los puntos de monitoreo y protección ambiental de las AS.

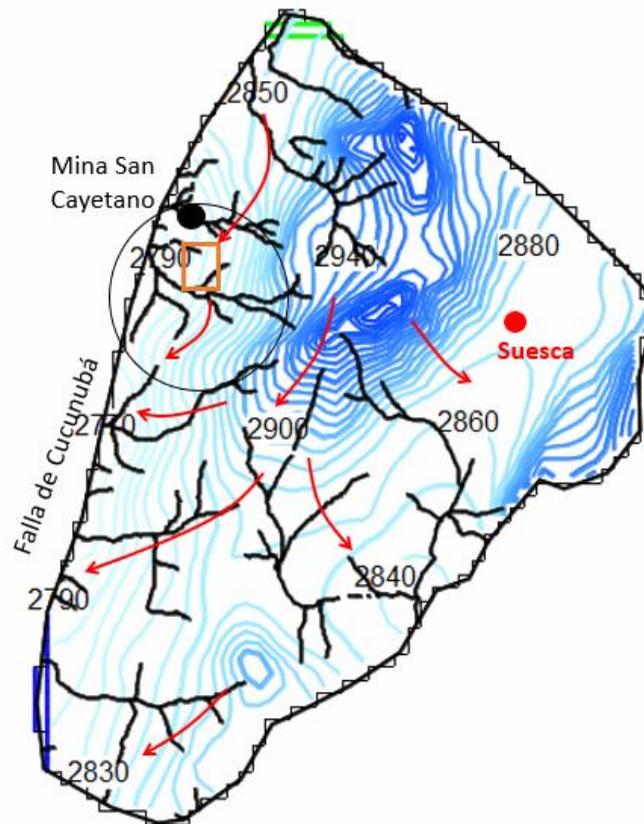
**Tabla 2.** Balance hídrico del modelo numérico

CUMULATIVE VOLUMES	L**3	RATES FOR THIS TIME STEP	L**3/T
IN:		IN:	
---		---	
STORAGE =	0.0000	STORAGE =	0.0000
CONSTANT HEAD =	0.0000	CONSTANT HEAD =	0.0000
DRAINS =	0.0000	DRAINS =	0.0000
ET =	0.0000	ET =	0.0000
RECHARGE =	347511168.0000	RECHARGE =	0.2202
TOTAL IN =	347511168.0000	TOTAL IN =	0.2202
OUT:		OUT:	
---		---	
STORAGE =	0.0000	STORAGE =	0.0000
CONSTANT HEAD =	0.0000	CONSTANT HEAD =	0.0000
DRAINS =	314351840.0000	DRAINS =	0.1992
ET =	33157370.0000	ET =	2.1014E-02
RECHARGE =	0.0000	RECHARGE =	0.0000
TOTAL OUT =	347509216.0000	TOTAL OUT =	0.2202
IN - OUT =	1952.0000	IN - OUT =	1.2517E-06
PERCENT DISCREPANCY =	0.00	PERCENT DISCREPANCY =	0.00

Fuente: elaboración propia en Modflow.

De ahí se infiere que el balance hídrico es una herramienta muy útil, pues resume las condiciones de los volúmenes del fluido (tabla 2). Esto evidencia la importancia de usar este modelo, que relaciona la infiltración del DAM con el comportamiento del recurso hídrico, y de esta manera cumple la finalidad de caracterizar los acuíferos de la zona de estudio.

En la figura 5 se observa en superficie la influencia de los ríos y la topografía, que controlan el grado de afectación de los acuíferos, junto con el grado de permeabilidad, la distribución de niveles freáticos y las características generales de los abatimientos (Pérez, 2013), en relación directa con la altura de la fuente de contaminación (Mina San Cayetano). Además de los valores de gradientes hidráulicos predominantes en el norte y con dirección de flujo hacia el occidente de Suesca, donde se encontró una influencia en el flujo vertical determinado por la gran actividad minera presente en la zona, que en este sentido implica una variación en la conductividad hidráulica.



**Figura 5.** Mapa de flujo en relación con las curvas equipotenciales.

**Fuente:** elaboración propia en Modflow.

Así pues, relacionado con las estructuras geológicas determinantes (figura 6), se destaca la falla de Cucunubá, que al ser de cabalgamiento se comporta como una barrera al flujo de las AS, al tiempo que pone en contacto rocas permeables de la Formación Labor y Tierna y Lidita Superior con rocas semipermeables de la Formación Guaduas, de muy baja capacidad de almacenamiento y transmisión de AS.

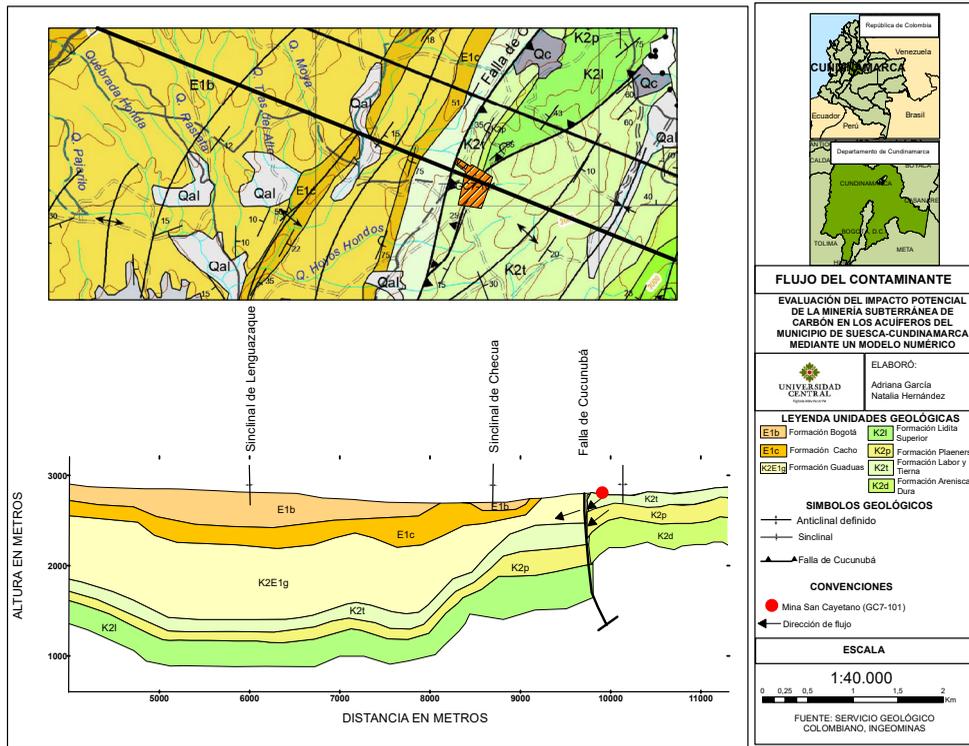


Figura 6. Perfil del flujo del contaminante.

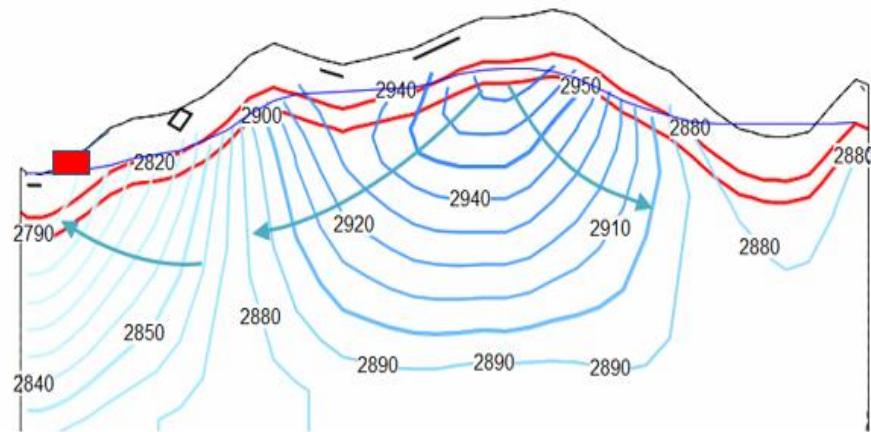
Fuente: elaboración propia con base en plancha 209 SGC (Montoya & Reyes, 2003).

También se observa la presencia de un anticlinal definido que, por gravedad, posibilita que el contaminante siga una trayectoria determinada. A esto se suma que los estériles se depositan directamente sobre el suelo, en contacto con la Formación Lidita Superior, atravesando la zona no saturada hasta llegar a los acuíferos. Este comportamiento puede favorecer la atenuación de ciertos contaminantes. Sin embargo, como se especifica en la teoría, no representa una protección eficaz, sino que, por el contrario, dada su baja velocidad de transporte, hace que el contaminante quede en solución o se bioacumule, como se deduce de los numerosos casos que afectan a gran cantidad de acuíferos (Moradell & Renau-Pruñonosa, 2019).

En concordancia con la dirección de flujo del contaminante se encuentra la Formación Guaduas, con una profundidad aproximada de 1000 m, en la cual se establecen dos mantos importantes de reservas de carbón y se han realizado perforaciones con dinamita, las cuales han generado fracturas que producen un aumento local de la conductividad hidráulica. Así, se da vía libre al paso de contaminantes a través de dicha formación.

En síntesis, existe una modificación antrópica de la conductividad hidráulica que podría promover el aumento del flujo y la modificación de las propiedades geológicas y químicas de los acuíferos. Esta problemática se debería tratar en estudios posteriores, pues en realidad no se presenta una fractura, sino un conjunto de fracturas inmersas en un medio poroso (Pérez, 2013). Por lo tanto, adquiere más relevancia que las minas abandonadas sigan un plan de desmantelamiento adecuado, pues, con el paso del tiempo, este orificio en el suelo modificará la conductividad, que adquirirá valores aún más elevados.

De igual forma, los potenciales hidráulicos son decisivos en la dirección de flujo del AS que siguen un comportamiento radial. En la figura 7, representado por la línea azul oscura, se identifica el nivel freático, que se ve alterado por acción clara del DAM. En este caso, se distingue un tipo de minería que suprayace el nivel freático, lo cual incentiva el aumento de la permeabilidad, sobre todo cuando las fracturas se extienden hasta la superficie e inducen una nueva recarga y aumentan el nivel freático.



**Figura 7.** Vista en perfil de las curvas equipotenciales y líneas de flujo.  
Fuente: elaboración propia en Modflow.

No obstante, según las profundidades de explotación, que pueden alcanzar los 670 m, se incluyen drenajes por bombeo que evitan la inundación de la mina. Como evidenció el estudio realizado en el municipio próximo de Guachetá, estos drenajes, con alto contenido de hierro y sulfatos, se vierten a las fuentes naturales sin ningún tipo de tratamiento previo (Villamil *et al.*, 2018), como sucede en la mayoría de minas concesionadas en Suesca. De la misma manera, en la hidrogeología analizada se encontró que se generan aguas ácidas que, una vez son drenadas, afectan el nivel freático y los caudales que en condiciones naturales fluyen hacia manantiales.

Ahora veamos que, cuando se habla de un contaminante no conservativo, puede haber afectación por procesos redox (Romero, 2016) e influencia de precipitaciones o alteraciones en las formaciones hidrogeológicas, como lo sugieren estudios que han sido contrastados en campo y en los cuales se estableció la eficiencia de las medidas de mitigación para una mina subterránea (Ninanya, 2015).

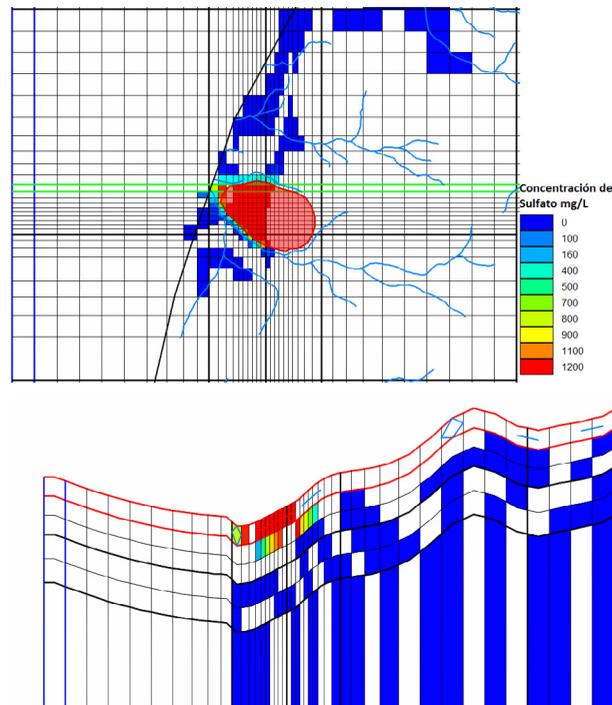
### 3.1 Escenario a cinco años

En la figura 8 se aprecia el área en rojo donde se ubican los desechos de minería y se presenta la pluma contaminante. La intensidad de los colores fue asignada de acuerdo con la concentración de 0 a 1 200 mg/L. De acuerdo con los resultados, es posible afirmar que al cabo de cinco años la pluma en superficie se extiende aproximadamente 62 metros

en dirección de la falla de Cucunubá, es decir, en la misma dirección del flujo de agua. Asimismo, se observa un ensanchamiento de la pluma como efecto de la dispersión transversal con concentraciones hacia el norte de 400 mg/L, aproximadamente, y hacia el sur con concentraciones cercanas a 160 mg/L.

Aunque la Resolución 0631 de 2015 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible establece que si dicha concentración de sulfatos eventualmente es vertida a un cuerpo de agua superficial, a pesar de no exceder el límite máximo permisible, si a futuro aumenta, limita la capacidad para su uso doméstico, ya que genera efectos intestinales adversos y en el ambiente disminuye la capacidad de infiltración del suelo.

Ahora bien, en profundidad, se puede apreciar que la pluma se ha extendido 80 metros hacia la segunda capa discretizada de la Formación Labor y Tierna. La pluma tiene una tendencia a extenderse hacia la falla de Cucunubá con menor intensidad que en superficie.

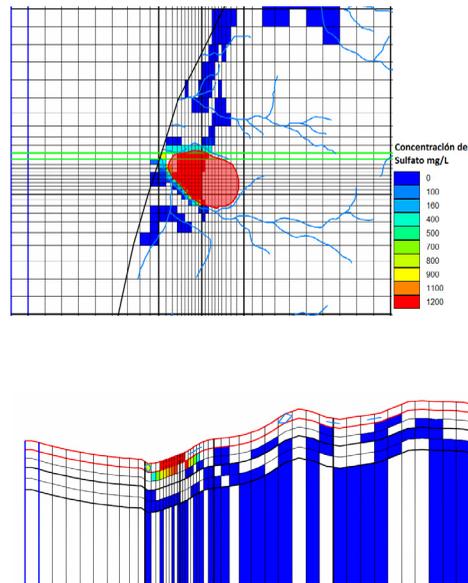


**Figura 8.** Vista en planta y perfil de la pluma contaminante de DAM al cabo de cinco años de la inyección continua.

**Fuente:** elaboración propia en Modflow.

### 3.2 Escenario a veinte años

En el planteamiento futuro del comportamiento de la pluma veinte años después, se pone en evidencia un escenario que advierte una condición alarmante en términos de alcance y concentración del contaminante. Como se ha descrito, debido a que la formación Labor y Tierna (K2t) tienen la conductividad hidráulica más alta ( $1 \times 10^{-4}$  m/día) y a su capacidad específica, los sulfatos percolarían a través de la primera capa discretizada, de manera que superarían los 110 m de profundidad (figura 9).



**Figura 9.** Vista en planta y perfil de la pluma contaminante de sulfato en superficie al cabo de veinte años.

**Fuente:** elaboración propia en Modflow.

Por tanto, a causa del alcance longitudinal del contaminante, este se proyecta como un escenario de afectación inminente a los cuerpos de AS y superficiales, pues, como se evidencia en la vista en perfil (figura 9), la concentración máxima de sulfatos se hace cada vez más densa al entrar en contacto con la ventana de agua o nivel freático. Adicionalmente, aunque las tonalidades amarillo y verde en esta segunda capa (K2t) indican disminución de la concentración, su dispersión aumenta en menores proporciones en el sentido de la falla de Cucunubá al cabo de veinte años, lo cual limita el uso del recurso no solo a nivel del subsuelo, pues se aprecia una interacción continua de las quebradas con la pluma contaminante. Específicamente, se presenta una contaminación directa de sulfatos de 400 mg/L, que, aunque no excede el valor máximo (1200 mg/L) establecido por la Resolución 0631 de 2015 del Minambiente, sobrepasa la barrera de los 200 mg/L, que como ya se mencionó es el umbral en el que las afectaciones ambientales y sanitarias se manifiestan.

Estos resultados permiten tener una aproximación muy significativa de los sistemas acuíferos estudiados, así como de la respuesta hidrogeológica frente a dicho comportamiento en el tiempo. A pesar de ello, y coincidiendo con Bode-Jiménez (2017), el modelo se basa en una problemática real. Sin embargo, muchos aspectos se modificaron en términos de estructuración del modelo de acuerdo con la escasa información disponible. En cualquier caso, se afirma que los DAM segregan sustancias nocivas para el medio hídrico y edáfico.

Asimismo, se reafirma el planteamiento de Pérez (2013), según el cual a causa de las perforaciones se generan cambios en el sentido del flujo de AS y aumento del riesgo de subsidencia. Pero no solo esto. Si bien Suesca cuenta con un sistema de acueducto que provee a la población, el transporte y la homogeneización de los sulfatos en altas concentraciones en los acuíferos del municipio significan un impacto negativo sobre estos, ya que la remoción del agente contaminante requiere tratamiento terciario, y si se recurriera a ellos como fuente de abastecimiento, sería una alternativa inviable.

## 4. Conclusiones

Fue posible caracterizar la geometría y geología, así como identificar las unidades hidrogeológicas regionales que comprende el municipio de Suesca. Esta información resultó sumamente útil para el reconocimiento de los materiales que predominan y la dirección del transporte de contaminantes en las AS. Así, se llegó a la conclusión de que los acuíferos de mayor interés son el grupo Guadalupe y Formación Cacho debido a su productividad en términos de conductividad hidráulica, por lo que son consideradas zonas de recarga y, a su vez, están más expuestas a los contaminantes almacenados en superficie.

Con base en la información disponible —muy limitada—, se puede afirmar que la calidad del agua en los pozos y manantiales es mala y no apta para el consumo, pues su contenido de hierro es elevado ( $>12$  mg/L). Se modeló la trayectoria de una concentración supuesta de sulfato, que si bien puede parecer en principio un valor excesivo (1200 mg/L), es importante asumir las peores condiciones, en términos de impactos ambientales, para asegurar que a futuro se tomen las decisiones más adecuadas.

Además, se definió un modelo numérico que determinó el transporte del contaminante mediante mecanismos que siguen la trayectoria de flujo. Su gradiente de concentración disminuye con respecto al alcance longitudinal. Dado el bajo nivel de discrepancia, no fue necesario calibrar el modelo, sabiendo que, además, no hay un registro de información de controles piezométricos. En este orden de ideas, con el escenario proyectado a veinte años, se espera que el DAM percole longitudinalmente a través de los 110 m de profundidad desde la superficie de Labor y Tierna, y que se aproxime a la falla de Cucunubá, homogeneizando con el nivel freático. Así, el potencial de aprovechamiento sería limitado, incluso para el sector industrial.

Por último, es indispensable agregar, a modo de recomendación, que en este escenario posterior a la extracción urge la necesidad de contar con estudios que den continuidad a esta investigación, en términos de cuantificar y evaluar la tasa de infiltración de los desechos de minería, dado el crecimiento extensivo de esta actividad, no solo en la región, sino en todo el mundo. En consecuencia, Colombia debe dejar de lado el modelo de economía extractivista y replantear la idea de desarrollo, pues está comprometiendo seriamente recursos naturales tan importantes como las AS.

## Referencias

- Australasian Groundwater & Environmental [AGE]. (2015). *Groundwater Impact Assessment* [No. G1606]. Byolong Coal Project EIS.
- Bode-Jimenez, G. (2017). *Assessment of potential impacts to subsurface bodies of water due to underground coal mining* [Tesis de Maestría, Universidad de Kentucky]. Repositorio UKY. <https://bit.ly/3ajCCf3>
- Bolaños-Alfaro, J., Cordero-Castro, G., & Segura-Araya, G. (2017). Determinación de nitritos, nitratos, sulfatos y fosfatos en agua potable como indicadores de contaminación ocasionada por el hombre, en dos cantones de Alajuela (Costa Rica). *Tecnología en Marcha*, 30(4), 15-27. <https://doi.org/10.18845/tm.v30i4.3408>

- Burbano, L., & Sánchez, L. (s. f.). Remoción de hierro y manganeso por oxidación-filtración para agua potable. En *Seminario internacional: Visión integral en el mejoramiento de la calidad del agua* (pp. 1-16). Universidad del Valle. <http://bvssper.paho.org/texcom/cd050704/burbano.pdf>
- Castrillón, F. J., Aravena, R., Manzano, M., & Quiroz, M. (2001). *Caracterización hidrogeoquímica de las aguas subterráneas de la cuenca alta del río Bogotá-Colombia* [Conferencia]. VIII Congreso Colombiano de Geología, V Conferencia Colombiana de Geología Ambiental, Manizales, Colombia. <https://bit.ly/3OObGDn>
- Corporación Autónoma Regional [CAR]. (2006). *Plan de ordenación y manejo de la cuenca hidrográfica del río Bogotá*. CAR. <https://www.car.gov.co/uploads/files/5ac24aeabc81c.pdf>
- Corporación Autónoma Regional [CAR]. (2014). *Aguas subterráneas minería-hidrocarburos*. CAR. <https://www.car.gov.co/uploads/files/5b45211d94bff.pdf>
- Environmental Protection Agency [EPA]. (s. f.). Sulfate in drinking water. <https://archive.epa.gov/water/archive/web/html/sulfate.html>
- Espinosa Rodríguez, M., Arteaga Balderas, E., Zambrano Cárdenas, R. M., & González Torres, L. (2010). Cinética de oxidación de la pirita, subproducto ácido del drenaje de la mina La Guitarra. *Ingenierías*, 13(49), 63-69. [http://eprints.uanl.mx/10440/1/49\\_Cinetica.pdf](http://eprints.uanl.mx/10440/1/49_Cinetica.pdf)
- González del Solar, N. (2013). Las aguas subterráneas en la dimensión internacional: Notas jurídicas sobre el acuífero Guaraní. *Derecho y Ciencias Sociales*, 9, 42-52. <https://revistas.unlp.edu.ar/dcs/article/view/735>
- Guerrero M. (2014). Minería de carbón en la sabana de Bogotá: ¿Podría ser sostenible? *IIEC*, 3(2), 11-16. <https://bit.ly/3ahAGDN>
- Hincapié, G., & Huguett, A. (2003). Atlas de aguas subterráneas de Colombia. Hidrogeología de las Planchas 5-01, 5-02, 5-03, 5-04, 5-06, 5-09, 5-13, 5-14. Instituto Colombiano de Geología y Minería. <https://adminmiig.sgc.gov.co/Lists/RecursosSGC/DispForm.aspx?ID=13053>
- Instituto Colombiano de Geología y Minería [Ingeominas]. (1993). Proyecto estudio hidrogeológico cuantitativo en la sabana de Bogotá. <https://bit.ly/3R-hDilZ>
- Jiménez Ballesteros, L. M. (2015). *Evaluación del aprovechamiento de estériles de carbón mediante integración de materiales orgánicos en suelos de zonas afectadas por la minería en el municipio de Guachetá* [Tesis de pregrado, Universidad Libre]. Repositorio Unilibre. <https://bit.ly/3RsfFh>
- Lenk, S., & Wisotzky, F. (2011). Chemical modelling of the groundwater composition in aquifers affected by lignite mine dumps discharge (surface mine Inden, Germany). *Environmental Earth Sciences*, 62, 581-591. <https://doi.org/10.1007/s12665-010-0549-8>
- Ministerio de Minas y Energía. (2012). *La cadena del carbón*. Unidad de Planeación Minero Energética. [http://www.upme.gov.co/Docs/Cadena\\_carbon.pdf](http://www.upme.gov.co/Docs/Cadena_carbon.pdf)
- Montoya, D., & Reyes, G. (2003). *Geología de la Plancha 209 Zipaquirá*. Ingeominas.

- Moradell, I., & Renau-Pruñonosa, A. (2019). Contaminación de aguas subterráneas: Algunos ejemplos. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 27(1), 3-17. <https://raco.cat/index.php/ECT/article/view/356261/448193>
- Muniruzzaman, M, Karlsson, T, & Kauppila, P. (2018). Prediction of the drainage water quality from mine wastes with reactive transport modelling. *Geological Survey of Finland*. [https://tupa.gtk.fi/raportti/arkisto/12\\_2018.pdf](https://tupa.gtk.fi/raportti/arkisto/12_2018.pdf)
- Ninanya de la Cruz, H. D. (2015). *Análisis numérico de flujo subterráneo: Caso mina subterránea de Vazante – Brasil* [Tesis de pregrado, Universidad Ricardo Palma]. Repositorio URP. <https://bit.ly/3yI1KWd>
- Pérez, A. J. (2013). Impacto de la minería subterránea en acuíferos: Perspectivas en el contexto colombiano. *IngeUAN - Tendencias en la Ingeniería*, 3(6), 7-21. <http://revistas.uan.edu.co/index.php/ingean/article/view/355>
- Resolución 0631 de 2015. “Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites y máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones”. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. *Diario Oficial*, n.º 49.486. <http://www.emserchia.gov.co/PDF/Resolucion631.pdf>
- Romero Pérez, J. (2016). *Evaluación de la oxidación química en el tratamiento del drenaje ácido producto de la actividad minera carbonífera* [Tesis de pregrado, Universidad Libre]. Repositorio Unilibre. <https://bit.ly/3OSr4yC>
- United States Geological Survey [USGS]. (2019, octubre 12). El ciclo del agua. <https://on.doi.gov/3uumtu1>
- Villamil Forigua, W. R., Castellanos Lizcano, E., & Pérez Sandoval, E. F. (2018). Aguas residuales de la mina de carbón “La Mana” del municipio de Guachetá, Cundinamarca. *Revista Nacional de Ingeniería*, 1, 1-7. <http://agenf.org/ojs/index.php/RNI/article/view/272>

# Análisis del desempeño de una celda combustible tipo membrana de intercambio protónico escala banco

Performance analysis of a proton exchange membrane fuel cell bench scale

Leidy Lorena Méndez Álvarez\* y Lyzed A. Toloza Blanco\*\*

---

---

## Cómo citar:

Méndez Álvarez, L. L., & Toloza Blanco, L. A. (2020). Análisis del desempeño de una celda combustible tipo membrana de intercambio protónico escala banco. *Ingeciencia*, 5, 143-158.

\* Grupo de investigación Agua y Desarrollo Sostenible, línea de investigación en Tecnologías Ambientales. Universidad Central.

\*\* Grupo de investigación Agua y Desarrollo Sostenible, línea de investigación en Tecnologías Ambientales. Universidad Central. Correo: ltolozab@ucentral.edu.co

## Resumen

A pesar de la alta demanda global de energía, se recurre poco a opciones alternativas o renovables para satisfacerla, en comparación con el empleo de combustibles fósiles. Este trabajo analiza la operación y desempeño de una celda de hidrógeno tipo membrana polimérica de intercambio protónico (PEM), que en este caso consiste además en un módulo solar y un electrolizador. La celda de intercambio protónico tipo PEM conduce los protones de hidrógeno ( $H^+$ ) para generar potencia, de manera que funciona como una tecnología híbrida que aprovecha la radiación solar. Aunque este prototipo de celda de hidrógeno escala banco demostró buen desempeño en las operaciones para su uso experimental, no podría suplir altas demandas energéticas con su configuración actual, pues aún se debe estudiar con mayor profundidad los mecanismos de conducción y aprovechamiento de la energía renovable en estas tecnologías. Con base en los resultados del estudio, se recomienda que Colombia aproveche los incentivos de leyes como la 1715 de 2014 para promover el uso del hidrógeno en dispositivos tecnológicos que exploten su potencial energético en el futuro.

**Palabras clave:** eficiencia, electrólisis, energía alternativa, hidrógeno, PEM.

---

## Abstract

There is a high demand for energy worldwide, however, to satisfy the need to access the alternative energy sources is low in comparison with fossil fuels. This work covers the understanding of the operation and performance of a hydrogen cell type proton exchange polymer membrane (PEM), which for this case consists of a team formed by a solar module, an electrolyser and a proton exchange cell type PEM, which drives the hydrogen protons ( $H^+$ ) to generate the required power. Which works as a hybrid technology since it also takes advantage of solar radiation. This bench sized hydrogen cell, is a prototype that showed good performance thanks to the operation and achieved results according to different practices and opening the opportunity to study the mechanisms of conduction and use of a renewable energy resource in these technologies. In Colombia, the promotion of laws such 1715/2014 promotes incentives to implementation alternative energy sources in power systems, providing opportunities to look to the hydrogen energy source's future to be exploited by technological devices which take advantage of all their energetic potential.

**Keywords:** alternative energy sources, efficiency, electrolysis, hydrogen, PEM.

## 1. Introducción

Una de las preocupaciones globales actuales es satisfacer la creciente demanda de energía de la agenda del siglo XXI. De acuerdo con la Agencia Internacional de Energía (IEA, 2013), a pesar de la alta demanda de energía que hay en el mundo, se recurre poco a opciones alternativas o renovables para satisfacerla, en comparación con el empleo de combustibles fósiles. La interrupción del equilibrio ecológico por los combustibles fósiles y su inminente agotamiento hacen que la demanda de energía sea un problema de urgente resolución para toda la humanidad, de modo que los países necesitan encontrar fuentes de energía nuevas, limpias y renovables. Por consiguiente, se deben desarrollar tecnologías nuevas y eficientes para estas fuentes (Apak *et al.*, 2017).

En contraste, la generación de energía a partir de combustibles fósiles, carbón y gas natural ocupan el 82% de la producción energética actual del mundo, mientras que solo el 14% lo proveen las fuentes de energía renovables como la solar, eólica, hidroeléctrica, biomasa, entre otras (Moreno & Vargas, 2013). Las celdas de combustible son otro ejemplo de energía respetuosa con el medio ambiente, debido a su funcionamiento libre de ruido y alta eficiencia, además de que como subproducto generan solo  $H_2O$  (Potosí-Guerrero *et al.*, 2016).

El objetivo de este estudio fue descifrar el funcionamiento y mecanismo de operación de una celda de combustible de hidrógeno tipo membrana polimérica de intercambio protónico (PEM) escala banco modelo ( $ECO H_2/O_2$ ) para analizar su eficacia en la generación de energía eléctrica a partir de una fuente renovable, entender sus principios de uso aplicando las leyes de Faraday. Así mismo, analizar la situación del hidrógeno como posible combustible para la generación de energía en Colombia.

Reconociendo la importancia de encontrar nuevas fuentes de energía alternativa y renovables, este trabajo aprovecha una tecnología híbrida de celda combustible, la cual se alimenta de energía solar para generar energía a partir de la electrólisis del agua, lo cual ocurre en el electrolizador. Así se supera esta etapa restrictiva en el costo de la energía a partir de hidrógeno aprovechado en la celda PEM.

En este sentido, la fusión de dos fuentes renovables, la energía solar y la del hidrógeno, en un solo dispositivo hacen de este trabajo un referente de este tipo de aplicaciones en la ingeniería, pues en la actualidad se busca el uso de tecnologías híbridas que permitan aumentar las eficiencias de operación de estas celdas de combustible. A escala, se podría pensar que el abastecimiento de agua para producir hidrógeno también provenga de un proceso no convencional, como la desalinización de agua de mar, de manera que se podría usar fuentes de agua fresca o desalinizarla para realizar la electrólisis. En este sentido, si se usa el agua de mar y se diseñan electrodos y electro-catalizadores a bajo costo que puedan resistir la corrosión implícita, se puede proveer una solución a escala para superar las barreras actuales (Lara, 2020).

Por consiguiente, se busca aprovechar la luz solar para generar energía eléctrica en el electrolizador de la celda y, a partir de la electrólisis del agua, cuyas reacciones se muestran en las tabla 1 y 2, promover la producción de energía química que es aprovechable en la celda de intercambio protónico y de esta forma producir la potencia necesaria para aplicar la energía requerida en la hélice.

Tabla 1. Reacciones de electrólisis en el electrolizador

Reacciones	Lugar de reacción
$2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 4\text{H}^+ + 4\text{e}^- + \text{O}_2$	Ánodo
$4\text{H}^+ + 4\text{e}^- \rightarrow 2\text{H}_2$	Cátodo
$2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{H}_2 + \text{O}_2$	Reacción total

Fuente: elaboración propia.

Tabla 2. Reacciones de electrólisis en la celda

Reacciones	Lugar de reacción
$2\text{H}_2 \rightarrow 4\text{H}^+ + 4\text{e}^-$	Ánodo
$4\text{H}^+ + 4\text{e}^- + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$	Cátodo
$2\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$	Reacción total

Fuente: elaboración propia.

## 2. Metodología

El equipo con el cual se realizó el proyecto es una celda de combustible  $\text{ECO H}_2/\text{O}_2$  de la empresa H-Tec, adquirido por el programa de Ingeniería Ambiental de la Universidad Central, el cual consiste en un sistema compacto que está formado por un panel solar, un electrolizador, dos tanques de almacenamiento de gas oxígeno ( $\text{O}_2$ ) e hidrógeno ( $\text{H}_2$ ), una celda de combustible de electrolito tipo membrana de intercambio protónico (PEM) y una hélice (figura 1).

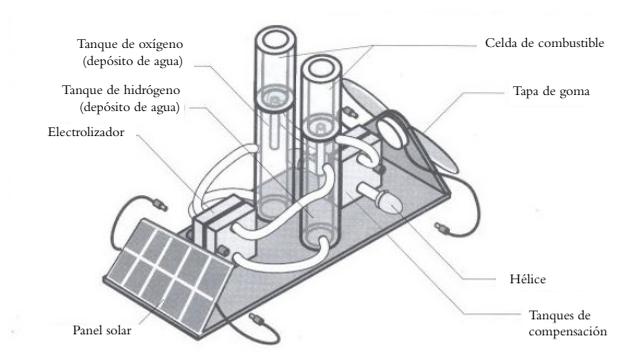


Figura 1. Esquema de la celda y sus respectivas partes.

Fuente: Hoeller *et al.* (2005).

El trabajo consistió en interpretar los fenómenos fisicoquímicos y eléctricos que ocurren cuando opera la celda de hidrógeno. Para esto se siguieron las medidas de seguridad indicadas en el manual, sin exceder el voltaje máximo de operación de 2 voltios. En concreto, se realizaron ensayos con la celda de hidrógeno en condiciones ambiente, utilizando agua desionizada con una conductividad promedio de  $74 \mu\text{S}/\text{cm}$ , una temperatura ambiente de  $20^\circ\text{C}$  y presión atmosférica de  $560 \text{ mmHg}$ , correspondiente a la ciudad de Bogotá. Como fuente de energía se usó la luz solar natural, que en la ciudad de Bogotá se encuentra en un rango de  $3,8\text{--}4,5 \text{ KWh}/\text{m}^2$  de irradiación media diaria anual, según datos reportados por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam, 2015).

## 2.1 Prácticas realizadas con la celda de hidrógeno

En el equipo se pueden hacer diversas prácticas, pero se eligieron cuatro descritas en los manuales y se adaptaron a los recursos y equipos de medición que tiene el Laboratorio de Aguas de la Universidad Central. En todas las pruebas se inició con el procedimiento de arranque de la celda en la forma como se describe en la figura 2. Las prácticas realizadas se describen en los siguientes apartados.

### 2.1.1 Estimación de la curva de potencia característica y eficiencia del panel solar

Se realizó una prueba solo conectando el módulo solar con la fuente de energía para medir cuánto voltaje (V) y corriente (I) generó el panel en el tiempo mientras se encontró expuesto a la fuente de radiación. Para esto se usó un multímetro y un luxómetro para estimar la iluminancia emitida. En este ensayo se calculó la potencia entregada por el panel y su eficiencia ( $\eta$ ), según las ecuaciones 1 y 2.

$$P [\text{W}] = I \cdot V \quad \text{Ecuación 1, Potencia generada (P).}$$

$$\eta = \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}} \quad \text{Ecuación 2, Eficiencia.}$$

### 2.1.2 Voltaje-corriente característicos del electrolizador

Para tomar los datos se realizó el montaje y arranque de la celda. Luego, en el momento en que se encendió la lámpara o se expuso a la luz solar, se empezaron a registrar los datos de corriente y voltaje por medio de los multímetros con circuito cerrado para voltaje y circuito abierto para la corriente. A través de esta curva se esperó observar el momento en el que el voltaje superó cierto valor teórico de hidrólisis de agua de 1,23 voltios.

### 2.1.3 Voltaje-corriente característicos y curva de potencia de la celda PEM

Para registrar los datos se conectaron los multímetros de igual forma que se hizo en el electrolizador, una vez se inició el arranque de la celda, es decir, cuando se expuso el panel solar a una fuente de luz. Esto permitió tomar los datos de volumen de gas producido y la corriente generada en la celda, los cuales confirmaron la producción y conducción de iones de hidrógeno a través de la celda.

Este ensayo se realizó con el fin de verificar el desempeño del electrolizador durante el tiempo de operación de la celda, iniciando con el arranque de la celda y el contacto con

la fuente de energía. Asimismo, se registraron los valores para las variables de corriente y voltaje, y se evidenció la producción de hidrógeno y oxígeno generados durante la operación. Estos datos permitieron calcular la eficiencia de energía ( $\eta_{\text{energía}}$ ) y la eficiencia de Faraday ( $\eta_{\text{Faraday}}$ ) para el electrolizador. La ley de Faraday permitió relacionar la corriente y el volumen de gas teórico producido según la ecuación 5, y la eficiencia fue la relación entre el volumen teórico calculado de gas hidrógeno y el real consumido por la celda, el cual fue experimental, según la ecuación 4, donde los términos I: corriente (Amperio), t: tiempo (s), z: altura de columna de gas (cm), F: constante de Faraday (C/mol), p: densidad (g/cm<sup>3</sup>), T: temperatura (K), R: Constante de los gases (J/mol K).

#### 2.1.4 Eficiencia de energía y eficiencia de Faraday de la celda PEM

Este ensayo se realizó con el fin de seguir el desempeño de la celda tipo PEM durante el tiempo de operación de la celda de hidrógeno tipo banco. Al principio se arrancó la celda expuesta con la fuente de energía, luego se conectaron las mangueras que transportan desde el tanque de almacenamiento de hidrógeno hacia la celda tipo PEM. Se aseguró el drenaje previo de la celda PEM abriendo la válvula de drenado del equipo. Se procedió a medir en simultáneo las variables de corriente y voltaje, así como el volumen de hidrógeno generado durante la operación. Estos datos permitieron calcular la eficiencia de energía mediante la ecuación 3, donde H: altura de la columna de gas, V: voltaje (voltio), I: corriente (Amperio), vol<sub>H<sub>2</sub></sub>: volumen de hidrogeno(cm<sup>3</sup>), t: tiempo(s) y la eficiencia de Faraday para la celda tipo PEM.

$$\eta_{\text{energía}} = \frac{V \cdot I \cdot t}{\text{Vol}_{\text{H}_2} \cdot H \cdot I} \quad \text{Ecuación 3, Eficiencia de energía.}$$

$$\text{Vol}(\text{calculado}) = \frac{R \cdot I \cdot T \cdot t}{F \cdot p \cdot z} \quad \text{Ecuación 4, Volumen calculado.}$$

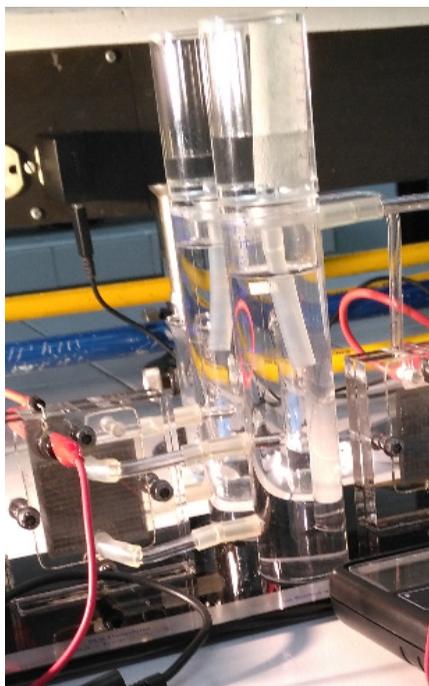
$$\eta_{\text{Faraday}} = \frac{\text{Vol H}_2 \text{ (calculado)}}{\text{Vol H}_2 \text{ (consumido)}} \quad \text{Ecuación 5, Eficiencia de Faraday.}$$

De acuerdo con las partes de la celda de hidrógeno (figura 1), el procedimiento para iniciar la operación con la celda de hidrógeno se presenta en la figura 2.



**Figura 2.** Diagrama de arranque de la celda de combustible.  
Fuente: elaboración propia.

La celda empezó a operar y desde el primer minuto se inició la toma de medidas, prestando especial atención al voltaje experimental que se alcanzó cuando se produjo la primera burbuja de gas hidrógeno. Esto se evidenció en el tanque de almacenamiento, en el cual se vio el desplazamiento de aproximadamente un centímetro cúbico del agua almacenada en el tanque (figura 3). Además, la corriente y el voltaje se midieron por aparte para el electrolizador y luego para la celda PEM durante 35 minutos de operación. Estas medidas permitieron calcular la potencia generada en el equipo y posteriormente la eficiencia tanto del electrolizador como de la celda PEM.



**Figura 3.** Tanques de almacenamiento de gas hidrógeno y oxígeno de la celda.  
**Fuente:** elaboración propia.

## 2.2 Registro y tratamiento de datos

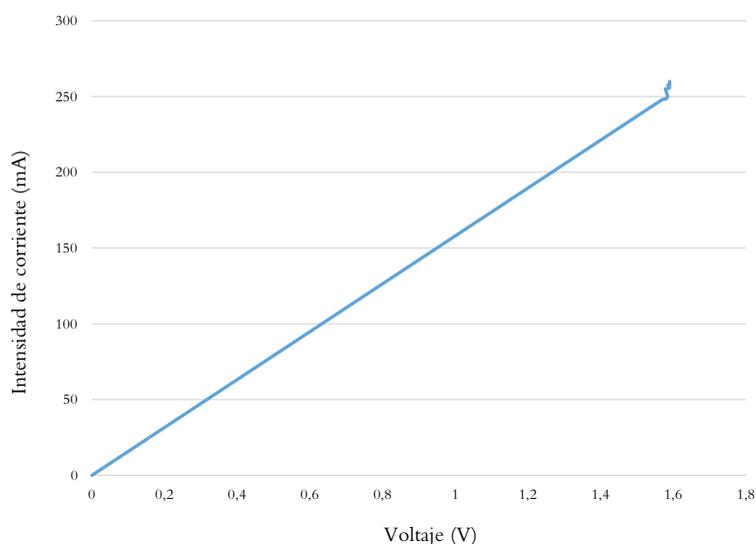
Se realizaron por triplicado las cuatro prácticas propuestas con la celda de hidrógeno, para las cuales se registraron las variables de volumen de producción de gases, así como las corrientes y los voltajes generados en el tiempo de operación para cada práctica (tabla 3).

Para cada terna de datos se calculó el coeficiente de variación (CV), el cual es la relación entre el tamaño de la media y la variabilidad de la variable (Departamento Administrativo Nacional de Estadística [DANE], 2008). Así se estableció el criterio de que para bajos CV es correcto realizar los cálculos con los valores promedio de las variables: corriente (I) y voltaje (V).

### 3. Resultados

La generación de hidrógeno gaseoso se logró por el funcionamiento de la celda combustible, en la cual ocurre la electrólisis. En este proceso se descompone el agua en iones de hidrógeno y oxígeno, lo cual genera un voltaje de disociación, que teóricamente corresponde a 1,23 voltios (Hoeller *et al.*, 2005).

Para el electrolizador se obtuvieron los valores de corriente y voltaje para ensayos por triplicado, con base en los cuales se elaboró la curva característica de corriente-voltaje (figura 4). Todos los ensayos tienden a un valor máximo aproximado a 1,45 voltios, correspondiente al valor experimental del voltaje de disociación del agua según los resultados de la tabla 3. Por consiguiente, el voltaje experimental de disociación del agua fue mayor que el teórico, pues para este tipo de celda estos sobrevoltajes o sobrepotenciales significan pérdidas e ineficiencias en el proceso electrolítico que ocurre en el electrolizador. Estas ineficiencias se pueden deber a que la membrana haya tenido perturbaciones por la cantidad de agua que se transporta en la celda, ya que poca o demasiada agua influye negativamente en su desempeño, lo cual se verifica con los resultados experimentales.



**Figura 4.** Curva característica de voltaje-corriente en el electrolizador.  
Fuente: elaboración propia.

**Tabla 3.** Resultados de mediciones principales y coeficientes de variación (CV)

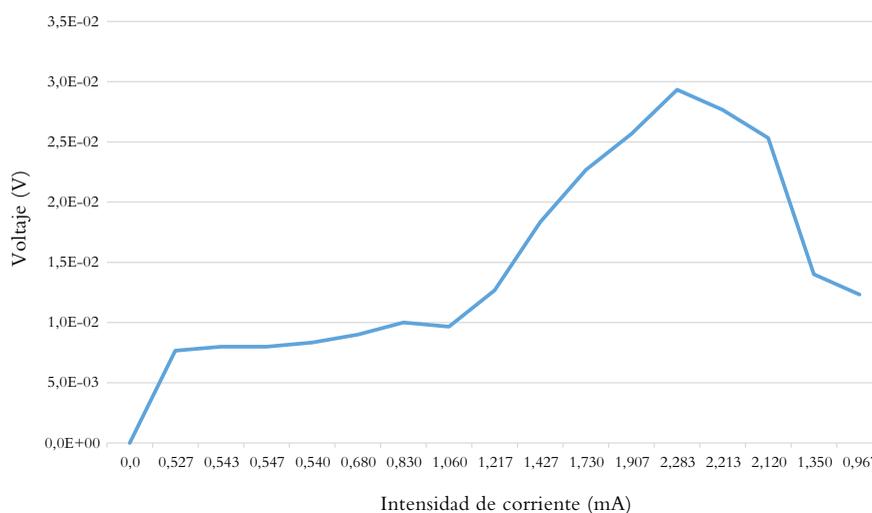
	Panel solar		Electrolizador		Celda PEM	
	V	I	V	I	V	I
Promedio	2,12	0,30	1,45	57,62	0,77	39
Desviación estándar	0,27	0,12	0,01	0,97	0,26	7,60
Coefficiente de variación	13%	39%	1%	2%	34%	20%

Fuente: elaboración propia.

Además, debido a que el electrolizador está elaborado con aleaciones de iridio, ocurre una reacción de oxidación de cuatro electrones de agua a oxígeno en el ánodo, según la reacción uno de la tabla 1. Estas aleaciones son actualmente la mejor técnica para llevar a cabo esta oxidación, así el sobrevoltaje se establece por encima del valor teórico necesario para el rompimiento de la molécula de agua equivalente a 1,23 voltios.

Con radiación solar como fuente de energía para la celda de hidrógeno se obtuvo una eficiencia del 85%, lo cual significa que esta energía es almacenada en el gas hidrógeno como potencial para su mecanismo de difusión y promoción de protones a través de la celda combustible. El porcentaje restante se asocia a pérdidas en el electrolizador. Esto es similar al resultado de la eficiencia de Faraday, que fue igual a 84%, la cual relaciona el volumen de gas hidrógeno producido por la operación del electrolizador mediante la electrólisis del agua y el volumen teórico de gas calculado por medio de ecuaciones de estado (ecuación 4).

En el caso de la celda tipo PEM, se realizaron tres réplicas para la operación con luz solar y se calculó un promedio para la curva característica de corriente y voltaje (figura 5); los resultados de la curva voltaje-corriente para la fuente de luz solar presentaron una tendencia creciente con el tiempo.



**Figura 5.** Curva característica de voltaje-corriente de la celda de combustible con fuente de luz solar.

**Fuente:** elaboración propia.

Los resultados muestran que la eficiencia operativa es de 28,68% y la de Faraday de 58,87% con radiación solar, cuya iluminancia en Bogotá es de 15,7lux, según las mediciones que se hicieron con un luxómetro. Si bien estos ensayos se realizaron en días soleados, cuando hubo nubosidad, la operación de la celda se interrumpió y generó tiempos con falta de producción de gas.

Se obtuvieron valores próximos a las eficiencias de Faraday reportadas en la literatura para estos dispositivos, que son de alrededor de 50%-60%. Estos resultados son muy satisfactorios y revelan una oportunidad real para este tipo de energías no convencionales, por cuanto constituyen una alternativa para responder a la crisis que se vive por

la dependencia a combustibles fósiles, lo cual hace necesario que se implementen otras fuentes de energía renovables como el hidrógeno.

En cuanto al bajo rendimiento operativo que evidenciaron los resultados de la celda, esto se puede deber, entre otros factores, al transporte del agua, que promueve fenómenos de inundación de la membrana, es decir, la acumulación de exceso de agua en el lado del ánodo o en el del cátodo de la membrana, pero sucede sobre todo en este último (Schmittinger & Wolfgang, 2008).

Cuando esto ocurre, el agua bloquea los poros de la capa de difusión de la celda e impide que los reactivos lleguen a los catalizadores, lo cual debilita el gas y produce una caída inmediata del potencial en la celda. Demasiada agua también agrava otros mecanismos de degradación, como la corrosión y la contaminación de los componentes (Schmittinger & Wolfgang, 2008). En este sentido, es importante que haya una buena gestión del agua, pues si la membrana está seca, o no contiene suficiente cantidad de agua, la conductividad decrecerá hasta cero (Mayandía, 2009). En otras palabras, poca o demasiada agua genera complicaciones en el rendimiento de la celda. Ahora bien, es más probable que la deshidratación de la membrana ocurra en el lado del ánodo de la membrana, con la disminución del contenido de agua. Como consecuencia, la conductividad disminuye, lo que produce una mayor resistencia iónica y mayores pérdidas (Schmittinger & Wolfgang, 2008).

El electrolito es muy importante en este tipo de dispositivo —de ahí es donde deriva su nombre—, pues la membrana tipo Nafion es la que permite el intercambio de protones  $H^+$  a través de ella y los electrones que retiene. Por esta razón la conductividad en la membrana es clave en el rendimiento, de modo que comercialmente la más utilizada es Nafion®, de DuPont, que consiste en una resina termoplástica que es relativamente estable, química y térmicamente, debido a su composición perfluorada. Se ha demostrado que las membranas de tipo Nafion son duraderas mientras se usan para el intercambio iónico o la electrólisis, además alcanzan altos promedios de duración en horas y una larga vida útil (Schmittinger & Wolfgang, 2008). El valor de la conductividad de la membrana Nafion comercial es de 8,3 S/m a 20 °C (Liu *et al.*, 2016).

## 4. Discusión

### 4.1 Relación entre la conductividad del agua y la difusión del ion hidrógeno

Todos los ensayos se realizaron con agua desionizada para garantizar el potencial de difusión en la celda de intercambio protónico. Si no se cuenta con un agua baja en contenido mineral, la membrana se tornaría un medio altamente resistivo para la conducción de los protones de hidrógeno y se generaría un gradiente de potencial de difusión menor. En este caso se debe trabajar con agua con conductividad iónica muy baja para garantizar que la difusión protónica del hidrógeno sea viable a través de la membrana.

La electrólisis del agua genera los protones de hidrógeno, que son conducidos en el ánodo. La conductividad es atribuida a la movilidad de los protones hidratados ( $H_3O^+$ ) como portadores de carga. El oxígeno es conducido hacia el cátodo, que se reduce y forma agua (Toloza, 2011). El agua es transportada a través de la membrana desde el ánodo al cátodo

por arrastre electro-osmótico, por ejemplo, por un flujo de agua asociado con la corriente protónica producida por la difusión del ion  $H^+$  (figura 6) (Altamirano, 2003).

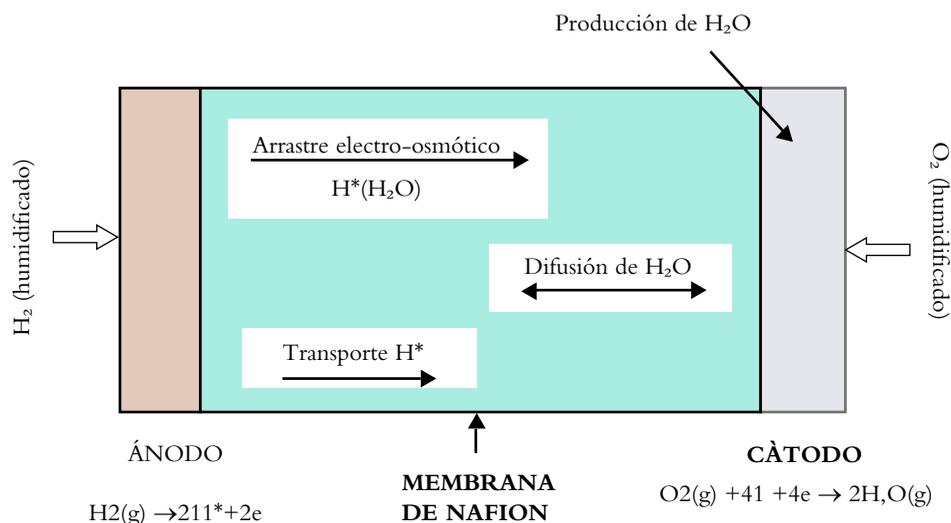


Figura 6. Distribución de flujo de agua en la celda PEM.

Fuente: Altamirano (2003).

Cabe resaltar que la hélice tiene unos parámetros de operación específicos que fueron diseñados y adaptados a esta celda de hidrógeno tipo banco (tabla 4). Cuando se operó la celda con la radiación solar, se alcanzaron estos parámetros de diseño y la hélice realizó el trabajo deseado girando durante 10 minutos, que corresponden a 35 minutos de operación de la celda y  $20\text{ cm}^3$  de gas hidrógeno producido.

Tabla 4. Especificaciones de la hélice

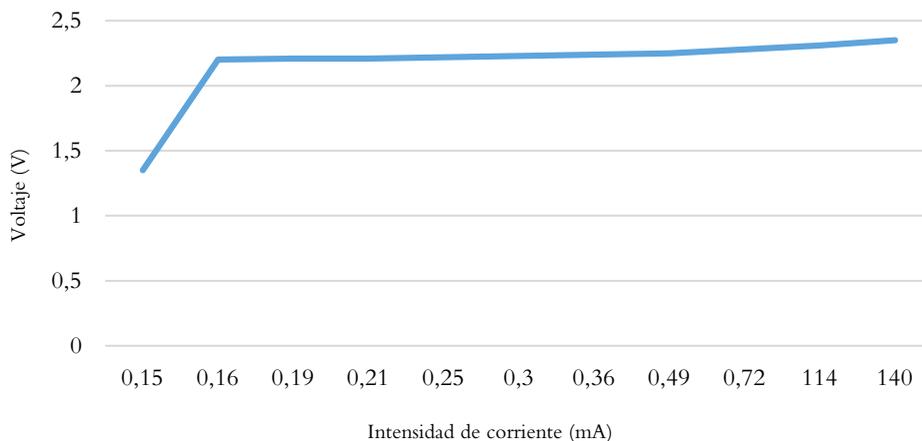
Potencia	Valor
Teórica mínima	10 mW
Práctica (luz solar)	63,63 mW

Fuente: elaboración propia.

Durante el proceso se pueden presentar diferentes pérdidas en la celda que influyen en su rendimiento, como las pérdidas resistivas, que suceden por el paso de iones de hidrógeno y electrones. Esto se puede minimizar utilizando una membrana electrolítica lo más fina posible, así como materiales de elevada conductividad y conexiones de baja resistencia (Mayandía, 2009).

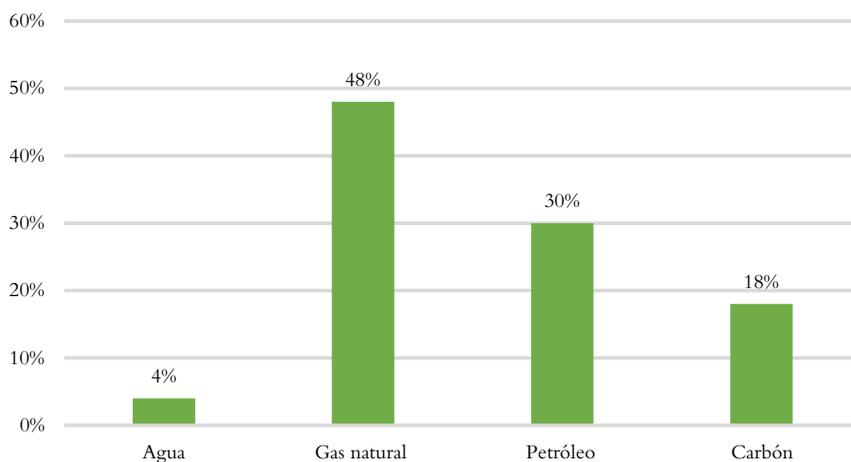
Parte importante de este equipo es el análisis del panel solar policristalino, en el cual inciden las ondas de radiación. Al respecto, se estimó la eficiencia del panel solar a partir de la relación entre la potencia de entrada y la de salida. Específicamente, la construcción gráfica de las variables medidas (figura 7) evidencia una eficiencia de 8,6% para este módulo solar. Es importante tener en cuenta que las eficiencias de este tipo de paneles comerciales están entre el 13% y el 15%, aunque en el mercado ya se cuenta con paneles más eficientes que alcanzan máximos de 18%. En este sentido, nuestro valor experimental

se encuentra cercano a estos valores comerciales, y la diferencia se puede asociar a que no todos los rayos de radiación inciden con la misma intensidad y dirección de flujo en el panel (Hoeller *et al.*, 2005).



**Figura 7.** Curva característica de corriente-voltaje en el panel solar.  
**Fuente:** elaboración propia.

Si bien existen diferentes métodos para obtener el H<sub>2</sub>, el mayor porcentaje proviene de combustibles fósiles (figura 8), los cuales no son renovables. Por su parte, la electrólisis sigue aportando un porcentaje muy bajo en comparación con estos procesos a escala. Sin embargo, siendo nuestro país rico en recursos hídricos, se puede generar hidrógeno, por ejemplo, en una asociación en el uso de energía solar para la producción de hidrógeno por electrólisis del agua, lo cual representa el uso de un recurso de energía renovable para la generación de un portador de energía versátil y eficiente (Bhattacharyya *et al.*, 2017).



**Figura 8.** Origen del hidrógeno producido en la actualidad.  
**Fuente:** Herraiz (2012).

Hoy en día la fuente principal de producción de hidrógeno industrial es el gas natural, que tiene un contenido muy alto de metano (figura 8), y el método más económico es el reformado con vapor de agua (Aguilar, 2017), que consiste en la reacción catalítica de una mezcla de vapor de agua e hidrocarburos a alta temperatura para formar hidrógeno, monóxido de carbono y dióxido de carbono. Esta oxidación parcial en presencia de oxígeno y vapor de agua también se puede producir a partir de biomasa.

No obstante la electrólisis es el método más adecuado para generar hidrógeno en términos medioambientales, es necesario definir el tipo de fuente de la cual se parte para obtener la energía indispensable para aplicar en el proceso (Herraiz, 2012). La electrólisis consiste básicamente en hacer pasar electricidad por unos electrodos metálicos, de manera que se desprende hidrógeno de agua. A continuación, en la tabla 5 se presentan las ventajas y desventajas de los principales métodos de producción de hidrógeno.

**Tabla 5.** Comparación de procesos para la producción de hidrógeno

Proceso	Ventajas	Desventajas
<b>Reformado con vapor</b>	Tiene elevada eficiencia. Perfectamente desarrollado a gran escala.	Genera emisiones de CO <sub>2</sub> . Se necesita gran infraestructura.
	Produce hidrógeno a bajo costo.	Las unidades a pequeña escala no son comerciales.
<b>Oxidación parcial</b>	La tecnología utilizada es muy avanzada.	Genera emisiones de CO <sub>2</sub> . Es necesario contar con gran infraestructura.
		Tiene elevados costos de inversión.
<b>Gasificación</b>	Tecnología muy desarrollada.	Produce grandes emisiones de CO <sub>2</sub> . Se necesita gran infraestructura.
	Abundancia y bajo costo de materia prima.	Tiene baja eficiencia.
<b>Electrólisis del agua</b>	No genera emisiones de CO <sub>2</sub> .	
	Tecnología testada. Hidrógeno de gran pureza	Tiene elevados costos energéticos.

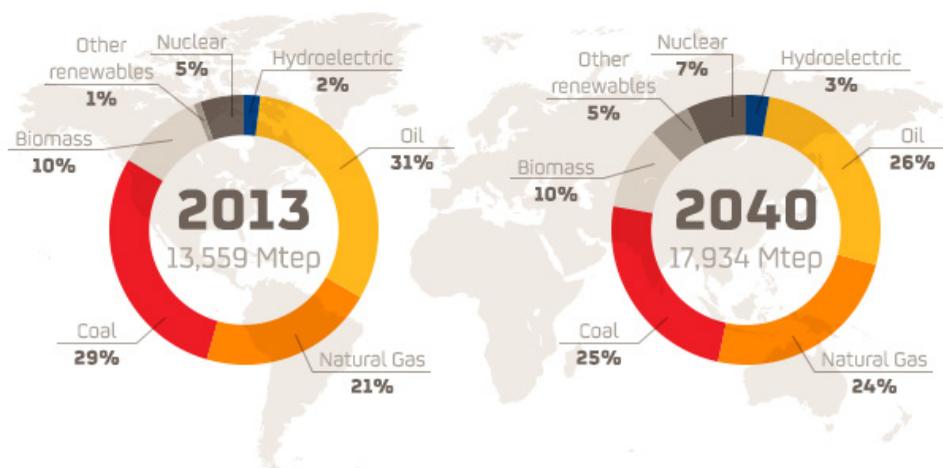
Fuente: Herraiz (2012).

Se resalta la importancia de conocer el estado del hidrógeno como vector energético en el país, siendo Colombia un país que goza de una matriz energética relativamente rica, tanto en combustibles fósiles como en recursos renovables. Actualmente, a grandes rasgos, el 93% de la explotación y producción energética del país está constituida por recursos primarios de origen fósil, aproximadamente el 4% de hidroenergía y el 3% de biomasa y residuos (Unidad de Planeación Minero Energética [UPME] *et al.*, 2015). Dado este potencial, es primordial conocer acerca de las regulaciones que permiten incentivar la implementación de estas energías en el país.

En el año 2014 se aprobó la Ley 1715, la cual promueve la integración de energías renovables no convencionales al sistema energético nacional, tiene el objetivo de lograr un

desarrollo económico sostenible y promueve estímulos económicos para las empresas que implementan energías renovables no convencionales (Potosí-Guerrero *et al.*, 2016). Este tipo de incentivos permiten que haya inversión y se pueda incrementar el suministro de energía en zonas no interconectadas, que son extensas en el país. Sin embargo, en Colombia los proyectos de fuentes no convencionales priorizan la energía solar y poco o nada se relacionan con el hidrógeno, lo cual muestra que el país no se ha volcado hacia esta fuente de energía.

Finalmente, según las proyecciones de la International Energy Agency (2013), la demanda de fuentes energéticas como el hidrógeno apenas aumentaría el 4% en todo el mundo (figura 9), un aumento pequeño si se consideran los problemas que podríamos tener en el futuro con las fuentes de suministro de energía convencional.



**Figura 9.** Perspectivas para el crecimiento de la demanda global de energía primaria. Fuente: International Energy Agency (2013).

## 5. Conclusiones

Con base en los análisis realizados se determinó que la celda tiene una eficiencia teórica de 58,8%, de acuerdo con las ecuaciones de Faraday, y la operativa según hidrógeno consumido y corriente generada es del 28,68%. Teniendo en cuenta que esto representa el 60% del valor de eficiencia reportado en la literatura, se concluye que la celda tiene buen desempeño para esta aplicación experimental, pero es necesario implementar nuevos ensambles y configuraciones que usen más de un módulo de membrana en serie para aumentar la eficiencia y poder emplearlo para suplir mayores demandas energéticas o a escala.

La configuración de la celda permitió realizar con éxito la electrólisis del agua, que ocurrió con un voltaje experimental próximo a 1,45 voltios. La rapidez con la que sucedió esto durante el arranque de la celda demuestra que el electrolizador opera de modo eficiente y, precisamente, su buen desempeño permitió que se haya logrado la difusión de protones de hidrógeno en la celda PEM para generar la energía que se proporciona en el elemento de control del circuito, en este caso la hélice.

Por último, dado que la eficiencia operativa de la celda con la luz solar es del 28,68%, es posible afirmar que podría ser mayor la cantidad de radiación aprovechada efectivamente por el área de captación en el módulo solar. En este sentido, si se aumentara el área del panel, con luz natural y los valores de radiación promedio de Bogotá, la celda operaría continuamente y generaría mayor potencia útil.

## 6. Recomendaciones

Dado que el uso de la luz solar en este dispositivo celda de combustible tipo PEM demostró un buen desempeño, se pueden configurar con más paneles solares y más módulos de celda para crear sistemas en otras ciudades con mayor radiación solar que Bogotá.

## Referencias

- Aguilar Aguilar, I. R. (2017). *Evaluación de alternativas para potencializar el uso de hidrógeno como vector energético* [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia]. Repositorio UN. <https://bit.ly/3PbgSAG>
- Altamirano, A. (2003). *Desarrollo de electrocatalizadores para una celda de combustible tipo PEM* [Tesis de maestría, Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica]. Repositorio Institucional. <https://bit.ly/3agCn4B>
- Apak, S., Atay, E., & Tuncer, G. (2017). Renewable hydrogen energy and energy efficiency in Turkey in the 21st century. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(4), 2446–2452. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.05.043>
- Bhattacharyya, R., Misra, A., & Sandeep, K. (2017). Photovoltaic solar energy conversion for hydrogen production by alkaline water electrolysis: Conceptual design and analysis. *Energy Conversion and Management*, 113, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.11.057>
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística [DANE]. (2008). *Estimación e interpretación del coeficiente de variación de la Encuesta General: Censo General 2005 – CGRAL*. DANE. <https://bit.ly/2HHm2BD>
- Herraiz Cardona, I. (2012). *Desarrollo de nuevos materiales de electrodo para la obtención de hidrógeno a partir de la electrólisis alcalina del agua* [Tesis doctoral, Universidad Politècnica de València]. Repositorio UPV. <https://bit.ly/3yjmbri>
- Hoeller, S., Voigt, C., & Kueter, U. (2005). *Fuel cell technology for classroom instruction: Basic principles, experiments, work sheets*. H-tec.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [Ideam]. (2015). *Atlas de radiación solar interactivo* (vol. 2) [Recurso en línea]. Ideam. <http://atlas.ideam.gov.co/visorAtlasRadiacion.html>
- International Energy Agency [IEA]. (2013, noviembre). *World Energy Outlook*. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2013>
- Lara Romero, G. E. (2020). *Generación de prototipo de célula foto-electrolítica para agua de mar* [Tesis de maestría, CETYS Universidad]. Repositorio CETYS. <https://repositorio.cetys.mx/bitstream/60000/1144/1/Estefania.Lara.pdf>

- Liu, L., Chen, W., & Li, Y. (2016). An overview of the proton conductivity of nafion membranes through a statistical analysis. *Journal of Membrane Science*, 504, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2015.12.065>
- Mayandía Aguirre, A. (2009). *Descripción y modelado de una pila de combustible de membrana de intercambio protónico* [Tesis de pregrado, Universidad Carlos III de Madrid, Madrid]. Repositorio UCRM. <https://bit.ly/3bWX3Ph>
- Moreno, L., & Vargas, C. (2013). *La tecnología del hidrógeno, una oportunidad estratégica para la perdurabilidad del sector energético en Colombia* [Tesis de maestría, Universidad de Nuestra Señora del Rosario]. Repositorio URosario. <https://bit.ly/3OPgiZQ>
- Potosí-Guerrero, B. A., Ramos-Paja, C. A., & Serna-Garcés, S. I. (2016). Impact of government incentives in the profitability of green energy production using fuel cells in Colombia. *Tecno Lógicas*, 19(37), 93-106. <http://www.scielo.org.co/pdf/teclo/v19n37/v19n37a07.pdf>
- Schmittinger, V., & Wolfgang, A. (2008). A review of the main parameters influencing long-term performance and durability of PEM fuel cells. *Journal of Power Sources*, 180(1), 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2008.01.070>
- Toloza Blanco, L. A. (2011). *Síntese e caracterização de polímeros epoxídicos sulfonados para membranas de célula a combustível do tipo PEM* [Tesis de maestría, Universidade Federal do Rio de Janeiro]. Repositorio Institucional. <https://bit.ly/3usYATC>
- Unidad de Planeación Minero Energética [UPME], Banco Interamericano de Desarrollo, & Fondo para el Medio Ambiente Mundial. (2015). *Integración de las energías renovables no convencionales en Colombia*. La Imprenta Editores. [https://bdigital.upme.gov.co/handle/001/1311\\_](https://bdigital.upme.gov.co/handle/001/1311_)

# Mil palabras en acción

## A thousand words in action

Los textos de mil palabras que se presentan en esta sección son el resultado del quehacer de los profesores en investigación, extensión y docencia, en sus respectivos campos de acción. La escritura de cada texto, sus gozos y usos, fue acompañada por un grupo de trabajo y un seminario permanente inaugurado para este fin. Por ello, tienen el tono comprometido de las conversaciones en la universidad, en los salones de los eventos, en las páginas de las revistas. Su propósito es comunicar la faena de la ingeniería, la ciencia o sus aprendizajes.

# Un enfoque académico para sensores de bajo costo para empoderar a la comunidad en la calidad del aire

Oscar A. Fajardo \*

**A**ctualmente existe una tendencia creciente en el uso de sensores de bajo costo para el monitoreo complementario de la calidad del aire en todo el mundo, lo cual ha empoderado a los ciudadanos y a las comunidades en temáticas que son fundamentales para el disfrute de una buena calidad de vida. La contaminación por material particulado o gases contaminantes en el aire que se respira está estrechamente vinculada con enfermedades respiratorias y cardiovasculares. La Organización Mundial de la Salud reporta que más del 90% de la población mundial se expone a mala calidad del aire, muchas veces desconociéndolo o sin saber cómo protegerse.

Típicamente, la medición de la calidad del aire se realiza por medio de los denominados métodos de referencia federal (FRM, por su sigla en inglés) o métodos equivalentes federales (FEM). Aunque sus mediciones son muy precisas y confiables, tienen como principal limitación un elevado costo económico para su instalación, operación y mantenimiento. Esto restringe de forma significativa su implementación masiva en los territorios, y dado que para operarlos es necesario un conocimiento técnico especializado, están fuera del alcance de la población en general. En consecuencia, a lo largo de estas últimas décadas, gracias a avances significativos en microelectrónica y en sistemas de comunicaciones inalámbricos, se han creado una serie de dispositivos de bajo costo que permiten hacer un seguimiento de variables ambientales, particularmente de aspectos relevantes en el estudio de la calidad del aire, como las concentraciones de partículas o gases.

A la fecha, aún se ve muy poco probable que estos sensores reemplacen los métodos tradicionales de monitoreo, pero su potencial de generar información complementaria de valor es innegable. En el caso de los sensores de material particulado, toman mediciones de tamaños de partículas comprendidas entre los 400 nm y los 10 000 nm, operan a humedad relativa del ambiente y cuando se supera el 80%–85% del valor normal, se ha reportado que su rendimiento puede resultar afectado significativamente; además, actualmente hay muy pocas herramientas estandarizadas que permitan corregir o ajustar los datos obtenidos. Sin embargo, varios autores aclaran que esto no significa que tengan un rendimiento menor, sino que aún no alcanzan la exactitud de los de referencia, y que se requiere un trabajo de la sociedad científica para su progresiva mejora.

\* Doctor en Ingeniería y Ciencias Ambientales de la Universidad Tsinghua (China), magíster en Desarrollo Ambiental Sostenible de la Universidad de Kingston (UK), ingeniero químico de la Universidad Nacional de Colombia. Investigador en contaminación del aire por material particulado, impactos en la salud asociados a la exposición de la población, desarrollo y aplicación de tecnologías de monitoreo de contaminantes. Vinculado a la Universidad Central desde el 2017 en la Facultad de Ingeniería de Ciencias Básicas y el Clúster NBIC. Correo: ofajardom@ucentral.edu.co

Estas nuevas herramientas tecnológicas son vistas como poderosas alternativas para generar avances en algunos aspectos científicos particulares, como puede ser determinar con mucho más detalle los niveles de exposición personal, al aumentar la cobertura espacial de forma masiva de las redes existentes. También permiten desplegar sensores en ubicaciones urbanas inaccesibles y esquemas de muestreo móviles o semimóviles. Pero se consideran aún más disruptivas cuando se usan como herramientas de enseñanza y socialización de temáticas ambientales para la población en general.

En otras latitudes y otros contextos sociales, la apropiación de estos sensores de bajo costo se ha dado más rápidamente. Sin embargo, los bajos niveles de educación formal y las reducidas tasas de dominio de una segunda lengua en Colombia han obstaculizado históricamente la posibilidad de que los ciudadanos adopten nuevos desarrollos tecnológicos y conocimientos científicos de forma más acelerada. Asimismo, al contrario de lo que ha ocurrido en otras regiones del mundo, donde las instituciones reguladoras ambientales han asumido el papel protagónico para evaluar y comunicar las capacidades y las limitaciones de estas nuevas tecnologías de bajo costo, las autoridades locales en Colombia no han participado de forma activa en esta revolución, de manera que han dejado un profundo vacío de información al público. Como se comentó previamente, esta tecnología es emergente, razón por la cual es importante realizar estudios en diferentes ambientes, ya sean abiertos o cerrados para validar su desempeño. Es por esto por lo que desde la academia se ha intentado implementar actividades para promover el desarrollo, la evaluación, el análisis y la socialización de estas novedosas herramientas.

En la Universidad Central hemos integrado el uso de sensores de bajo costo en actividades de aula, proyectos de grado interdisciplinarios y proyectos de investigación para aumentar la visibilidad de los sensores de bajo costo. Esto es particularmente relevante en nuestro caso porque estamos ubicados en Bogotá, una megaciudad latinoamericana, uno de los centros urbanos más grandes de América del Sur con problemas de contaminación del aire mayores que el promedio de la región. Adicionalmente, la contaminación en la ciudad se distribuye de forma heterogénea, focalizada principalmente en los distritos de bajos ingresos, lo cual genera mayor vulnerabilidad para sus residentes. Allí yace la importancia de empoderar a la población con herramientas que ellos mismos puedan implementar y entender, que les permitan tomar decisiones informadas en su vida diaria para proteger su salud y la de sus familias.

A la fecha contamos con nuestra propia red de monitoreo de material particulado empleando estos sensores y con comunicación IoT, que, en tiempo real, permite conocer las concentraciones del contaminante en la zona de influencia de la Universidad Central y que estará publicada para el acceso de cualquier persona interesada. También hemos realizado campañas de monitoreo en colegios de básica primaria en las localidades de Puente Aranda y Barrios Unidos, donde al finalizar las mediciones se hacen campañas de socialización de los resultados, de las tecnologías empleadas y de las alternativas que tenemos las personas para protegernos de la contaminación. Es especialmente motivante ver el interés que manifiestan los más pequeños en aprender sobre estos temas y sobre los instrumentos cuando se llevan a cabo las actividades, ya sea presencial o virtualmente.

Creemos que estas pequeñas acciones de socialización y el uso de estos sensores de bajo costo aportan de forma fundamental en el empoderamiento de las personas y que redundará en ciudadanos más conscientes de los riesgos y de las alternativas con que cuentan para protegerse, pero también de su papel activo en la ciudad. Las decisiones que tomamos como individuos diariamente impactan la calidad del aire que respiramos.

# Enfoque de la innovación en la clase de eco-diseño: ejercicio rápido de prospectiva

Aida Sanes Orrego\*

*Hubo un tiempo, hace cuatro o cinco mil años, en que la humanidad estaba confinada a la superficie de la Tierra. Aun así, su cultura tecnológica era bastante avanzada, y la población aumentó de tal suerte que el menor fallo técnico hubiera significado el hambre y las enfermedades para millares de personas...*

Isaac Asimov (“Profesión”)

**E**l eco-diseño es una herramienta clave de la producción más limpia y la eco-eficiencia, ya que se encarga de la revisión y evaluación de un producto a partir de su ciclo de vida para ser rediseñado con criterios de sostenibilidad en sus cinco etapas (obtención, fabricación, comercialización, uso y desuso). Para esto es muy importante entender que el análisis de los productos y la implementación de esta metodología requieren trabajo interdisciplinar en las organizaciones, lo que hace imperante la formación en este tema desde distintas áreas del conocimiento. Esta metodología además se encarga de implementar una visión innovadora, y dado que los productos deben lograr mantener su espacio en el mercado y satisfacer a los consumidores responsables a través del tiempo, es necesario acompañar el proceso de formación en esta área con procesos creativos.

En la clase de eco-diseño los estudiantes escogen un producto y lo revisan en las diferentes etapas de la metodología. Luego de evaluar los aspectos ambientales del ciclo de vida del producto, viene la etapa de rediseño, en la cual es muy importante emplear recursos creativos que permitan profundizar en la necesidad del producto, más que en el producto en sí mismo, ya que entenderlo desde allí facilita el proceso de innovación.

Además, en el desarrollo de la clase se busca incentivar la innovación radical, entendiéndola como un camino que facilita el cierre de los ciclos productivos, ya que ver más allá del producto facilita medidas importantes de eco-diseño, como la desmaterialización, la sustitución de productos por servicios, entre otros, es decir, logra cambios de paradigma frente a la forma en que usualmente se hacen las cosas.

\* Magíster en Medio Ambiente y Desarrollo y diseñadora industrial. Profesora del programa de Ingeniería Ambiental, Universidad Central, Bogotá. Correo: asaneso@ucentral.edu.co

Como trabajo creativo antes de iniciar con las propuestas de cada grupo en torno a su producto, se diseñó un ejercicio a partir del uso de la prospectiva, que se puede entender de manera general como la observación y el análisis del futuro en determinada área. En el caso de la clase, el ejercicio consiste en visualizar el mundo en mil años, con dos premisas: la vida humana se mantiene, como también lo hace la necesidad del producto analizado. Para realizar este ejercicio, los participantes ya tienen muy clara la necesidad a la que está vinculado el producto por los análisis que han realizado en las etapas previas.

Los estudiantes deben redactar uno o dos párrafos sobre el contexto de la vida en ese momento, es decir, en el año tres mil, y además explicar cómo se satisface en ese año la necesidad que hoy cubre su producto. También deben hacer un dibujo que acompañe la explicación. Este es un ejercicio rápido de trabajo en clase, los estudiantes deben realizarlo en máximo sesenta minutos, ya que su fin es plasmar de manera fluida pero impulsiva lo que se piensa del escenario planteado.

En procesos de diseño, proyectar contextos tan lejanos permite mucha libertad, ya que se rompen barreras y prejuicios frente a lo que se puede o no hacer, la situación es tan hipotética que todo es posible, seguro habrá otros materiales, otras formas de vivir, otros desarrollos tecnológicos, y esa liberación de las ideas es fundamental para abrir las posibilidades al rediseño. Incluso es liberador en cuanto a dejar por un momento lo que saben de sus productos, al abordar de manera lejana toda la información que de una u otra manera satura, así como por el desarrollo de otras habilidades de comunicación que este ejercicio propone y les permite descubrir.

De igual forma, la visión sobre el futuro plantea circunstancias con un componente ambiental muy fuerte, porque los lleva a pensar en el consumo de recursos a largo plazo, lo que obliga a los estudiantes a hacer propuestas claras sobre aspectos ambientales de los productos, sea en materiales, en uso de energía, e incluso en la relación con un usuario más consciente.

El trabajo realizado se acompaña con una revisión posterior sobre los productos más innovadores que se encuentran actualmente, tanto en el mercado como en desarrollo o todavía como conceptos de diseño. Esta exploración permite a los estudiantes entender que muchas de sus ideas sobre el futuro están hoy en ejecución, lo que los lleva a reflexionar sobre los pocos límites que existen en cuanto a desarrollo industrial y los grandes límites que tienen frente a lo que conocen y podrían plantear, lo cual indudablemente los lleva a ser más propositivos en las etapas posteriores de rediseño.

Al socializar esta actividad en clase se amplía aún más su visión del futuro en la industria al verla a través de sus compañeros, y es así como mucho de lo que encuentran en sus escritos y sus propuestas con este ejercicio se refleja más adelante en la lluvia de ideas e incluso en la propuesta final del curso.

La aplicación de la prospectiva a un ejercicio de rediseño en el desarrollo de la clase permite dar un salto entre la revisión estructurada de la información del ciclo de vida del producto y su evaluación, a la lluvia de ideas sobre las mejoras con un criterio transversal de innovación. Esto no solo redundará en mejores propuestas de un diseño con criterio ambiental, sino que también permite un espacio de reflexión sobre el futuro en términos ambientales, sobre el futuro de la industria, de los productos y nuestra relación con ellos, pero además los estudiantes lo logran desde un espacio de exploración creativa, y en términos generales esto es lo que busca el eco-diseño: entender que desde el diseño consciente se define el futuro del mundo.

# La sostenibilidad, un sistema dinámico

Sandra Cecilia Bautista-Rodríguez\*

La sostenibilidad es un tema complejo, pues se asocia con una idea que puede tener diferentes significados para muchas personas. El debate sobre estrategias, planes o acciones específicas que conducirían a resultados sostenibles puede empantanarse cuando sus detalles son vistos por diferentes partes interesadas con opiniones distintas. Si estos debates se pueden llevar a cabo dentro de un marco claro y consensuado, se mejora la capacidad de alcanzar una solución razonable para las partes. De allí surge la necesidad de modelos, métodos y herramientas que permitan a los tomadores de decisiones analizar cómo sus determinaciones afectan al sistema como un todo y cómo las soluciones planteadas tienen implicaciones a futuro.

## 1. ¿Por qué la dinámica de sistemas?

Entre las herramientas disponibles para construir un marco de toma de decisiones sostenibles destaca la modelación en dinámica de sistemas (DS). Esta modelación tiene una sólida base matemática, es flexible y expone protocolos bien desarrollados para la construcción, verificación y análisis de modelos. En particular, la modelización en DS es una herramienta ideal para examinar sistemas complejos caracterizados por la retroalimentación y los efectos retardados, características que subyacen a tantos problemas ambientales (Bautista *et al.*, 2019).

La modelización en DS se utilizó por primera vez para abordar la sostenibilidad en los modelos de los límites del crecimiento de principios de la década de 1970. Desde entonces, los modelos de DS se han vuelto más sofisticados y fáciles de usar, con *software* de uso libre para propósitos académico y de investigación, utilizada en cursos de modelación en el programa de Ingeniería Ambiental. Durante el mismo período, la DS se ha convertido en una herramienta influyente para examinar posibles escenarios futuros (Albin, 1997).

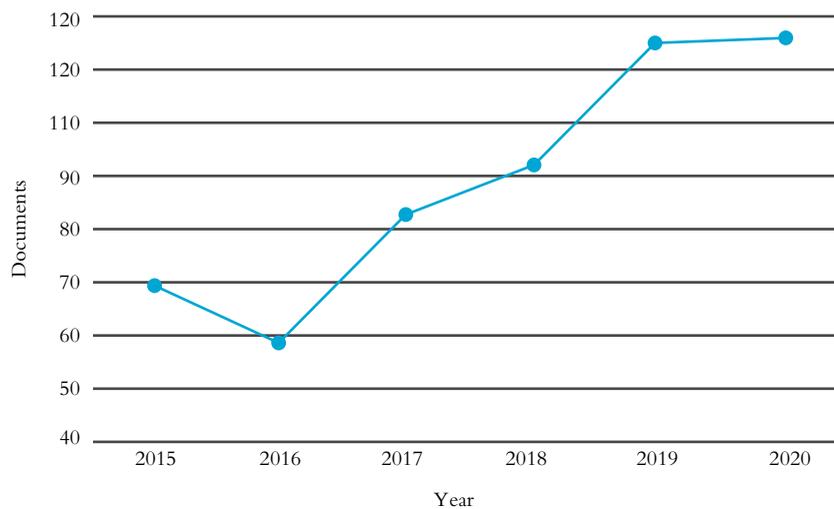
La DS es una estrategia de modelación con un enfoque eficaz para tratar problemas; la comprensión de cómo las variables relevantes a un problema de interés interactúan entre sí, se influyen, se retroalimentan, es el punto central de la metodología de dinámica de sistemas. En DS es necesario que el modelo proporcione una explicación válida del sistema real. El objetivo de un estudio de dinámica de sistemas es mostrar cómo y por qué se genera el problema y encontrar puntos en él que sean eficaces para eliminar los factores que lo

\* Posdoctora en Modelamiento, doctora en Ingeniería, magistra en Medio Ambiente y Desarrollo, ingeniera química. Profesora del Programa de Ingeniería Ambiental, Grupo de Investigación Agua y Desarrollo Sostenible, Universidad Central, Bogotá. Correo: sbautistar2@ucentral.edu.co

originan. Estos puntos se aplican luego para hacer políticas que los solucionen. La DS se ha utilizado en muchos ámbitos, como el análisis social y económico, los sistemas agrícolas, la gestión de los recursos naturales y el desarrollo sostenible (Ruiz & Bautista, 2021).

## 2. ¿Cuáles son las tendencias de modelación de DS y la sostenibilidad?

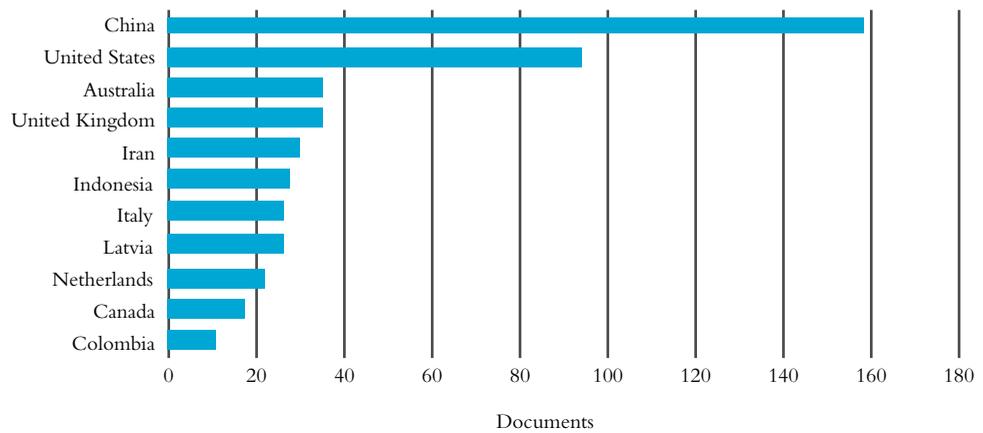
Con el objeto de establecer las áreas temáticas que son tendencia de la modelación en DS asociadas a la sostenibilidad, inicialmente se realiza un análisis bibliométrico y luego un análisis de red. El primero se hace con base en una fórmula booleana de búsqueda en la base de datos Scopus utilizando como palabras clave “system dynamic modelling” o “system dynamics modelling” o “system dynamic model” o “system dynamics model” o “system dynamics approach” y “environmental” o “sustainability”. Posteriormente, limitando la búsqueda a la palabra clave exacta del autor sobre “System Dynamics” o “System Dynamics Model” y “Sustainability”, en el período 2015–2021 se identificaron 577 documentos, lo cual muestra una tendencia creciente en el número de estudios, pues se pasó de 68 investigaciones en 2015 a 117 en 2020 (figura 1). Esta cifra evidencia el creciente interés de los investigadores en la modelación en DS para estudiar la sostenibilidad.



**Figura 1.** Documentos por año encontrados en el análisis bibliométrico.

**Fuente:** elaboración propia.

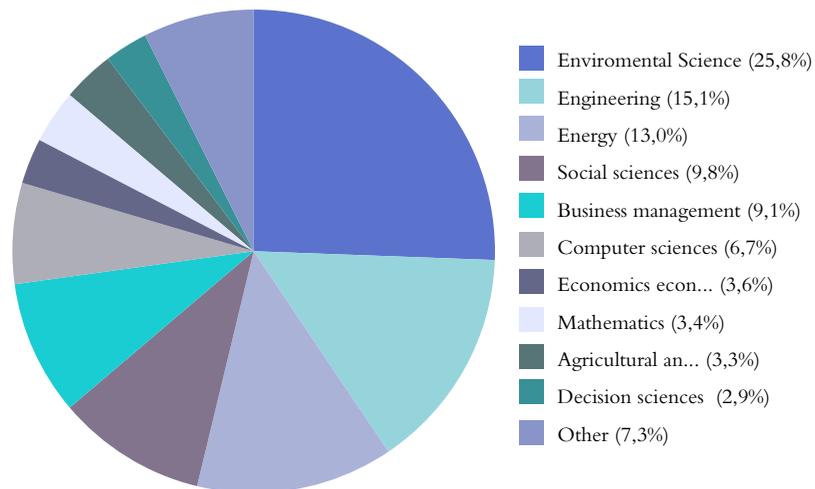
Los países en donde se encuentran concentrados los estudios son China y Estados Unidos, pues los dos publicaron casi el 50% de todos los trabajos. En Colombia se reportan doce estudios, tres de los cuales fueron desarrollados en la Universidad Central (figura 2).



**Figura 2.** Documentos encontrados en el análisis bibliométrico según país.  
Fuente: elaboración propia.

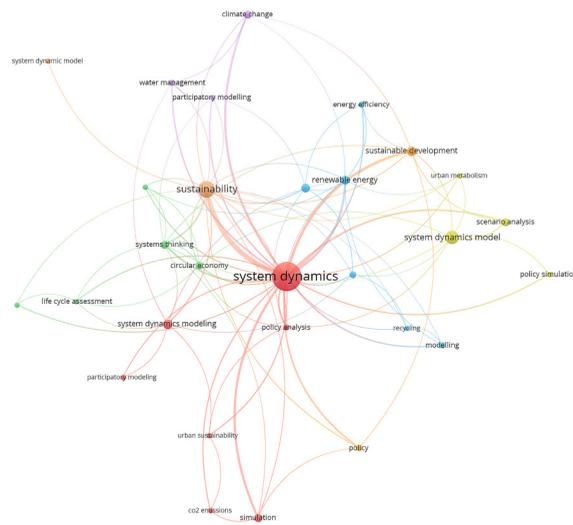
### 3. ¿Cuáles son las áreas temáticas más relevantes?

Se resalta que los estudios en sostenibilidad que utilizan la modelación en DS se centran en tres áreas: las ciencias ambientales, la ingeniería y la energía. Igualmente, se tienen estudios en áreas muy relevantes, como las ciencias sociales, los negocios y las ciencias de la computación (figura 3).



**Figura 3.** Áreas temáticas de los textos identificados en el análisis bibliométrico.  
Fuente: elaboración propia.

Asimismo, se hizo un análisis correlacional utilizando el software VOSviewer y se estableció una red temática, en la cual los colores representan clústeres y el tamaño del círculo el grado de repetición del tema en los estudios (figura 4) (Eck & Waltman, 2010). En el nodo central está la DS vinculada con la sostenibilidad. Los clústeres son generados a partir de la mayor correlación que se encuentra entre los términos.



**Figura 4.** Red temática de las áreas abordadas en los textos consultados.  
**Fuente:** elaboración propia en VOSviewer.

Se tiene un clúster azul ligado a la gestión de residuos, el reciclaje y los modelos de participación social. El clúster verde resalta las relaciones entre los estudios sobre economía circular y el análisis de ciclo de vida. El clúster morado trata sobre la gestión del agua y el cambio climático, ambos temas relacionados con modelos de participación social. El clúster verde-azulado asocia estudios que utilizan la modelación en DS para analizar sistemas de energía renovable y eficiencia energética. El clúster rojo, por su parte, articula los trabajos asociados con la sostenibilidad urbana, el análisis de políticas, la emisión de dióxido de carbono y el desarrollo sostenible. Finalmente, el clúster verde claro es muy cercano al clúster precedente, con estudios sobre metabolismo urbano, simulación de políticas y escenarios.

A manera de conclusión, el análisis de clústeres permite evidenciar el gran potencial que tiene la modelación en dinámica de sistemas para la comprensión y el análisis de problemas ambientales para proponer soluciones sostenibles.

## Referencias

- Albin, S. (1997). *Building a System Dynamics Model Part 1: Conceptualization*. Massachusetts Institute of Technology. <https://bit.ly/3bOd4qJ>
- Bautista, S., Espinoza, A., Narvaez, P., Camargo, M., & Morel, L. (2019). A system dynamics approach Colombia. Baseline simulation. *Journal of Cleaner Production*, 213, 1-20. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.111>
- Eck, N. J., & Waltman, L. (2010). Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping. *Scientometrics*, 84(2), 523-538. <https://doi.org/10.1007/s11192-009-0146-3>
- Ruiz Galeano, D.A., & Bautista Rodríguez, S. C. (2021). An integrated method of environmental analysis and system dynamics for management of mobile phone waste in Colombia. *Journal of Cleaner Production*, 279, Article 123768 <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123768>



La preparación editorial del volumen 5 de *Ingeciencia* estuvo a cargo de Ediciones Universidad Central.

En la composición del texto se utilizaron fuentes Bembo Std, Memphis LT Std y Centaur.

La revista se publicó en 2022 en la ciudad de Bogotá.

# ingeciencia



UNIVERSIDAD  
CENTRAL