

# INGENIERÍA, INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO

Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia

*Volumen 18 Nº 2 Julio-Diciembre 2018*

**ISSN 1900-771X**  
**E-ISSN 2422-4324**



Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia  
Sogamoso- Boyacá, Colombia  
Vol. 18 N°. 2 Julio-Diciembre 2018



REVISTA INGENIERÍA, INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO

**Rector:**

Alfonso López Díaz

**Vicerrector Académico:**

Hugo Alfonso Rojas Sarmiento

**Vicerrector de Investigación y Extensión (VIE):**

Enrique Vera López

**Decano Facultad:**

Luis Alejandro Fonseca Páez

**Director-Editor:**

Oscar Iván Higuera Martínez

**Asistente Editorial:**

Olga Lucía Chaparro Barrera

**Diseño:**

Lorena María Alarcón Aranguren

**Diagramación e Impresión:**

Búhos Editores Ltda.

**Correspondencia Canje y Suscripciones**

**a nombre de: Revista Ingeniería, Investigación y Desarrollo**

UPTC Sogamoso-Boyacá, Colombia

Calle 4 Sur N° 15-134

Edificio Administrativo-Tercer Piso

Tel. (57+8) 770 5450 Ext. 2606

**E-mail:** [revistaiid@uptc.edu.co](mailto:revistaiid@uptc.edu.co)

**DOI:** <http://dx.doi.org/10.19053/issn.1900-771X>

Los conceptos expresados en los artículos son de exclusiva responsabilidad de sus autores y no comprometen a la publicación.

Categoría C Índice Bibliográfico Nacional Publindex – COLCIENCIAS

II Actualización del IBN- Publindex 2014

**Comité Editorial y Científico**

**Ph.D. Pedro Fabián Cárdenas Herrera**

Universidad Nacional de Colombia

**Ph.D. Gabriel Peña Rodríguez**

Universidad Francisco de Paula Santander- Ufps

**M. Sc. Andrés Fernando Jiménez López**

Universidad de los Llanos

**Ph.D. Jorge Julián Moreno Rubio**

Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia

**Ph.D. Juan María Menéndez Aguado**

Universidad de Oviedo

**Comité de Arbitraje:**

Ph.D. Alexander Pérez Ruiz

Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito

MSc. Francisco Javier Ibagüen Ocampo

Universidad del Quindío

MSc. Heiner Castro Gutiérrez

Universidad del Magdalena

MSc. Nelson Javier Escobar Mora

Universidad Pontificia Bolivariana

MSc. Luis Carlos Olmos Villalba

Institución Universitaria Pascual Bravo

Ph.D. Carlos Arturo Ávila

Universidad de los Andes

Ph.D. José Ignacio Marulanda Bernal

Universidad EAFIT

Ph.D. Jeison Marín Alfonso

Universidad Pontificia Bolivariana

MSc. Ramiro Alejandro Plazas Rosas

Universidad del Valle

Esp. Carlos Gabriel Correa Chaparro

Fundación Universidad de América

MSc. Christian Ricardo Zea Forero

Pontificia Universidad Javeriana

MSc. Andrés Fernando Jiménez López

Universidad de los Llanos

MSc. William Fernando Álvarez Castañeda

Universidad Santo Tomás

MSc. Oscar Oswaldo Rodríguez Díaz

Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia

MSc. Andrea Catalina Alvarado Fajardo

Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia

MSc. Edgar Absalón Torres Barahona

Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia

MSc. Luis Ariel Mesa Mesa

Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia

ISSN 1900-771X e-ISSN 2422-4324

Revista Ingeniería Investigación y Desarrollo

## TABLA DE CONTENIDO

<b>EDITORIAL</b> .....	4
<b>MODELO MATEMÁTICO PARA ADMINISTRAR EL INVENTARIO DEL BANCO DE SANGRE DE UN CENTRO HOSPITALARIO</b> <i>Mathematical model to manage the inventory of the blood bank of a hospital center</i> Jairo Arboleda Zúñiga, Bryan Fernando Salcedo Moncada .....	5
<b>LIXIVIACIÓN DE COBRE CONTENIDO EN TARJETAS DE COMPUTADOR PCB PARA LA EXTRACCIÓN DE METALES PRECIOSOS</b> <i>Lixiviation of copper content in pcb computer cards for the extraction of precious metals</i> Ginna Alejandra Jiménez Tovar, Mario Parra Pinilla .....	15
<b>ANÁLISIS Y COMPARATIVO DE LOS AMPLIFICADORES ÓPTICOS SOA, EDFA Y RAMAN</b> <i>Análisis y comparativo de los amplificadores ópticos soa, edfa y raman</i> Sergio Moreno, Daniel Torres, Gustavo Puerto .....	22
<b>COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE MATERIAL COMPUESTO REFORZADO CON FIBRAS DE CHONTADURO (BACTRIS GAPISAPES)</b> <i>Mechanical behavior of chontaduro (bactris gapisapes) fiber reinforced material composite</i> Juan Pablo Villate Díaz, Nelson Joman Vargas Ortiz .....	29
<b>MODELACIÓN MATEMÁTICA DE TECHOS VERDES EN COLOMBIA: SELECCIÓN DE UN MODELO MEDIANTE LA METODOLOGÍA AHP</b> <i>Selection of a mathematical model through the AHP methodology to model green roofs in Colombia</i> Jeniffer Tabares Catimay, Laura Marely Gallo Martínez, Néstor Alonso Mancipe .....	35
<b>UNA REVISIÓN SISTEMÁTICA DE LITERATURA SOBRE LA GESTIÓN DE LA PROPIEDAD INTELECTUAL EN INSTITUCIONES DE EDUCACIÓN SUPERIOR</b> <i>A systematic literature review of Intellectual Property Management in Higher Education Institutions.</i> María Luisa Villalba Morales, Francisco Javier Montoya .....	47

## EDITORIAL

La Revista Ingeniería Investigación y Desarrollo (I<sup>2</sup>+D) de la Uptc, durante los últimos 10 años, se ha dedicado a la difusión de artículos científicos en las diferentes áreas de la ingeniería. Gracias a los enormes esfuerzos de parte de sus editores, I<sup>2</sup>+D ha logrado ser reconocida y categorizada por el Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación de Colombia (COLCIENCIAS). De esta manera, la revista ha venido consolidándose como un excelente medio para compartir importantes resultados de investigación, tanto para autores nacionales como internacionales. Siendo para mí, un verdadero honor, haber sido invitado a redactar esta Editorial.

Por lo tanto, quisiera a través de este escrito, dar un especial reconocimiento al Ingeniero Oscar Iván Higuera, por el arduo trabajo realizado como actual Jefe Editorial de la revista; sin olvidar, por supuesto, a su predecesor el Ingeniero Oscar Oswaldo Rodríguez. Además, es para mí importante, agradecer el apoyo incondicional de su Asistente Editorial Olga Lucía Chaparro, y de María Lorena Alarcón, diseñadora gráfica de la revista. No puedo olvidar, por otra parte, reconocer el inmenso apoyo otorgado al presente número de nuestra revista, por parte del equipo de revisores, los cuales podemos consultar en la página legal de esta publicación. De manera muy sincera, reciban los más grandes agradecimientos.

Para este número, fueron arbitrados 20 artículos, de los cuales 7 fueron publicados, obteniéndose una tasa de aceptación del 35%. Esta publicación, abre con un interesante estudio que revela la composición química de las partículas atmosféricas, a través de técnicas de Espectrofotometría UV-VIS y Espectrometría de Masas en la ciudad de Riohacha en Colombia, con el ánimo de determinar la calidad del aire que respiran sus habitantes. Luego, nos encontramos con dos artículos de interés para aquellos estudiosos del área de Control. El primero, muestra el diseño de controladores multivariables aplicados a un intercambiador de calor, mientras el segundo, muestra un diseño de controlador de intensidad luminosa para optimizar procesos de fotocurado. Una interesante reflexión, acerca del panorama del sector eléctrico y la posible inclusión de fuentes no convencionales de energía renovable en Colombia, es encontrada a continuación. Siguiendo nuestra marcha a través de la publicación, nos encontramos con una interesante aplicación de la primera y segunda ley de la termodinámica, dentro del marco del uso eficiente de la energía, el análisis exergético de una planta de cogeneración operando bajo ciclo combinado. Se cierra este volumen, con dos atractivos artículos dentro de la línea de la gestión en ingeniería. El primero, muestra el impacto de las normas ISO9000 en el mejoramiento continuo de los procesos industriales y sugiere técnicas y herramientas para su adecuada implementación. El número finaliza con un importante análisis de la deserción estudiantil en la Uptc, problemática de alto interés en las instituciones de Educación Superior de nuestro país.

Finalmente, no queda más que invitar a toda la comunidad científica del área de la ingeniería, a someter sus artículos-productos de investigación a I<sup>2</sup>+D. Para nosotros, será un placer servirles y agradecerles por sus importantes aportes al crecimiento de la investigación en nuestra región.

Sinceramente,

**PhD. Jorge Julián Moreno Rubio**  
**Editor Invitado.**

*Cómo citar este artículo:*

J. Arboleda-Zuñiga, and B.F. Salcedo-Moncada, "Modelo matemático para administrar el inventario del banco de sangre de un centro hospitalario", *Rev. Ing. Investig. Desarro.*, vol. 18 (2), pp. 5-14, Julio. 2018.

## MODELO MATEMÁTICO PARA ADMINISTRAR EL INVENTARIO DEL BANCO DE SANGRE DE UN CENTRO HOSPITALARIO

### Mathematical model to manage the inventory of the blood bank of a hospital center

Jairo Arboleda Zúñiga<sup>1</sup>, Bryan Fernando Salcedo Moncada<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidad Pontificia Bolivariana, Escuela de Ingeniería Industrial, Grupo de Investigación en Sistemas Aplicado a la Industria (GISAI), Colombia. Email: jairo.arboleda@upb.edu.co, bryan.salcedo@upb.edu.co

*(Recibido marzo 29 de 2018 y aceptado junio 27 de 2018)*

#### Resumen

En el presente artículo se desarrolla un modelo matemático para la planeación y el control del inventario de glóbulos rojos en el banco de sangre de un centro hospitalario de nivel III ubicado en la ciudad de Santiago de Cali, este modelo es un soporte para la toma de decisiones, que permite brindar un nivel adecuado de servicio a los usuarios, reduciendo los costos de operación incurridos en el vencimiento de las unidades sanguíneas y en la adquisición a proveedores externos, contribuyendo a solucionar la problemática presente en el Valle del Cauca y algunas regiones de Colombia, donde los bancos de sangre se encuentran desabastecidos de unidades sanguíneas.

Inicialmente se caracteriza el comportamiento de la demanda de los glóbulos rojos; posteriormente, se realiza la construcción del modelo matemático, basado en programación lineal por metas donde se utilizan variables aleatorias para considerar la caducidad y sustitución por compatibilidad de las unidades sanguíneas y se da un tratamiento de restricciones flexibles a los objetivos, donde cada uno de estos tiene una penalización para agotados, obsoletos y adquisiciones externas de unidades sanguíneas.

Se logra correr el modelo de 8087 variables a través de modelado algebraico AMPL, obteniendo resultados específicos para cada grupo sanguíneo. La operatividad y resultados del modelo fueron verificados con alto grado de confiabilidad a través de la simulación discreta donde se recrearon varios escenarios. En conclusión, este modelo se constituye como una herramienta formal y estructurada para la planeación y control de la cadena de abastecimiento de sangre de otros centros hospitalarios.

**Palabras clave:** Cadena de suministro de sangre; Control de inventarios de sangre; Modelamiento matemático.

#### Abstract

In this article, a mathematical model is developed for the planning and control of the red blood cells inventory in the blood bank of a hospital center (3rd level) located in Cali, Colombia. This model pretends to provide an adequate level of service to users, reducing operating costs incurred in the expiration of blood units and in procurement from external suppliers, contributing to solve the problems present in El Valle del Cauca and some regions of Colombia, with lacks of blood banks.

At first place, the demand of red blood cells is characterized. Then, the construction of the mathematical model is made, based on linear programming by goals where random variables are used to consider the expiration and substitution for compatibility of the blood units and a treatment of flexible restrictions is given to the objectives. Each objective demands penalty for being spent, obsolete and external purchases of blood units.

It was possible to use the model of 8087 variables through AMPL algebraic modeling, obtaining specific results for each blood group. The operability and results of the model were verified with a high degree of reliability through discrete simulation where several scenarios were recreated. In conclusion, this model is a formal and structured tool for the planning and control of the blood supply linked to other hospital centers.

**Key words:** Blood supply chain, Control of blood inventories, mathematical model.

## 1. INTRODUCCIÓN

La encuesta de disponibilidad y seguridad de la sangre a nivel mundial, emitida por la Organización Mundial de la Salud (OMS), indica el índice ideal de captación sanguínea para un país, el cual debe estar entre el 1% y el 3% [1]. En el contexto colombiano en el año 2012 el índice fue del 0,159%, es decir que la captación Nacional no cumplía con los parámetros establecidos por la OMS. En el año 2014, el índice logra aumentarse para estar dentro del ideal. No obstante, más del 50% de la captación sanguínea está concentrada en los departamentos de Bogotá, Antioquia y Santander, mientras que la demanda es homogénea en todo el territorio. [2-3].

Existe un panorama crítico en los bancos de sangre de la región del Valle del Cauca. La Cruz Roja y La Fundación Valle del Lili como principales captadores de unidades sanguíneas, se encuentran en un alto desabastecimiento. Captando entre 17 y 18 unidades diarias de 50 unidades necesarias en la Fundación Valle del Lili, al igual que en el hemocentro de la Cruz Roja, donde se reciben 50 unidades diarias de 120. Esto indica que los principales hemocentros de la región captan entre un 35% y un 42% de unidades requeridas por la demanda. Por consiguiente, las reservas de los hemocentros se están destinando para la atención de emergencias y retrasando la programación de cirugías en varias clínicas de la ciudad [4-5].

Puesto que la administración de la sangre involucra algunas complejidades como sustitución de componentes y pruebas cruzadas, la precisión de los modelos es completamente difícil de alcanzar, nuevas investigaciones en los bancos de sangre se han focalizado en desarrollar mejores sistemas de información para facilitar en forma más rápida los resultados de las pruebas y así establecer el ordenamiento de los pedidos [6].

Es así como para crear un modelo para el manejo de este tipo de inventarios es importante conocer que en la planeación y control de estos se maneja una alta complejidad debido a la variación de la demanda, la escasez y aleatoriedad de la oferta, los tiempos de entrega originados por el alistamiento, las pruebas a las unidades recolectadas, sustitución de unidades sanguíneas por compatibilidad y el almacenamiento de un producto perecedero [6].

Es por esto que el objetivo del proyecto es desarrollar un modelo para la gestión de inventarios en la cadena de suministros de glóbulos rojos de un centro hospitalario, con el fin de brindar un nivel adecuado de servicio a los usuarios, reduciendo los costos de operación incurridos por el vencimiento de las unidades sanguíneas y las adquisiciones a proveedores externos.

El desarrollo de este proyecto se encuentra enmarcado en tres fases principales, iniciando con la caracterización de la demanda, la construcción del modelo matemático mediante la programación lineal por metas y finalmente la convergencia del modelo.

Para este artículo específico, en el segundo apartado se muestran los antecedentes de la investigación, en el tercer apartado la metodología empleada, en el siguiente se explica la construcción del modelo matemático, en el cuarto se muestran los resultados y finalmente se presentan las conclusiones y referencias utilizadas.

## 2. ANTECEDENTES

Para comprender el tipo de producto que trabaja el modelo, se estudia la clasificación de los ocho tipos de sangre a partir del sistema ABO y el factor Rh, según la presencia o ausencia de antígenos reactivos en la superficie de los glóbulos rojos [7-8].

Según la política nacional de sangre del Ministerio de Protección Social, se estima que en Colombia el 60% de la población nacional pertenece al grupo sanguíneo O (O+ 56% y O- 4%), 25% al grupo A (A+ 23.5% y A- 1.5%), 10% al grupo B (B+9% y B- 1%) y 5% al grupo AB (AB+ 4.5% y AB- 0.5%). De este modo los bancos de sangre buscan mantener inventarios para cada grupo sanguíneo, marcándose como objetivo la satisfacción de la demanda sanguínea de la región, mientras evitan incurrir el vencimiento de las mismas unidades [9].

Estableciendo factores fundamentales para definir las cantidades de unidades a mantener en un inventario sanguíneo, la gestión de inventarios en los hemocentros debe reconocer en primer lugar la demanda; Como el número de unidades de sangre de cualquier tipo requerido en los centros hospitalarios (1 unidad = 450 ml aproximadamente). La escasez; Fenómeno donde la demanda supera el número de unidades de sangre

disponibles en los inventarios. Finalmente es necesario reconocer la caducidad; Momento en que una unidad sanguínea se ve descartada por exceder su vida de anaquel, por ejemplo, 42 días para los glóbulos rojos [10].

Debido a esta última condición, donde la sangre es de naturaleza perecedera, los administradores de los bancos de sangre se encuentran con que la administración de este producto es un problema de gran complejidad, donde en ocasiones se tienen excesos de las unidades de sangre que no son solicitadas y se ven agotadas aquellas de las que los pacientes necesitan [6]. Ratificando la importancia de caracterizar los patrones de demanda.

El patrón de demanda más simple es el de demanda perpetua, la cual se mantiene por largos periodos de tiempo con pequeñas fluctuaciones en rangos pequeños. La demanda estacional es aquella donde se esperan picos en determinados periodos de tiempo, como la venta de artículos navideños. El patrón de demanda errático, se caracteriza por grandes fluctuaciones en el tiempo, pasando de periodos de cero demandas a grandes picos, diferenciándose de los demás por no poder predecirse [11]. En estudios previos se ha podido comprobar como la demanda de unidades sanguíneas es altamente variable, ajustándose a un comportamiento errático [12].

La alta variabilidad o incertidumbre de esta demanda supone un reto para ofrecer soluciones específicas para problemas de la región como es el caso o de la misma industria. Existen investigaciones recientes donde a partir de modelos Bayesianos se logra definir las cantidades a ordenar, almacenar y reducir los costos de inventario, logrando ofrecer un escenario en donde se esté preparado para los cambios abruptos de la demanda en el tiempo [13].

La investigación a nivel de demanda irregular, realizada en un banco de sangre de Alemania, donde la Programación Dinámica de Markov (MDP), combinada con simulación, demostró que disminuyendo la dimensión y aplicando el análisis combinado, se pueden definir reglas de reposición para mejorar el servicio; estas reglas lograron mostrar resultados cercanos al óptimo, y a través de un análisis de sensibilidad, se pudieron controlar los agotados y los costos de producción para la administración del inventario de plaquetas [14].

Tomando como ejemplo el banco de sangre hospital clínico de Barcelona, se logró desarrollar un modelo estocástico que simula la operación con un número finito de días, esto permitió que se analizaran diversos factores que influyen en las tasas de escasez y de obsolescencia, factores como la media y el coeficiente de variación de la demanda CVD, resaltando este último como el mejor parámetro para determinar el desempeño de un banco de sangre [15].

En la Ciudad de la Habana, en el Instituto Superior de Medicina Militar, con el objetivo de calcular el inventario mínimo de glóbulos y plasmas, se construyó un modelo útil para evitar la caducidad de unidades sanguíneas y así incrementar su eficiencia, logrando disminuir los envíos regulares de unidades sanguíneas desde los centros abastecedores [16].

En materia de redes que consoliden la cadena de suministro de sangre a través de grandes centros regionales, cabe resaltar a Chile, por medio del Centro de Sangre de Concepción, esta organización abastecedora de sangre surte a más de 20 establecimientos hospitalarios de salud del sur del país. Replicándose en otras regiones del país, esta red cubre la necesidad de los hospitales del territorio Nacional [17].

En la actualidad las investigaciones en la administración de bancos de sangre, ha estado dirigida a la garantía del suministro de sangre en toda la red y la mejora de los modelos de pronósticos. Un ejemplo de ello es la demostración de que la centralización de los inventarios en la cadena de suministro sanguínea es un factor clave de acuerdo a modelos de redes de programación lineal entera mixta [18]. La teoría de restricciones también toma fuerza en modelos donde se relacionan la caducidad, escasez y aleatoriedad para determinar la causa raíz de la problemática [19]. El carácter perecedero y uso por sustitución de este producto también es abordado mediante modelos de análisis multicriterio donde mediante la tasa de surtido es posible manejar estas dos condiciones [20].

Finalmente, también es importante evaluar la red de abastecimiento de sangre, existe un estudio dirigido a su evaluación mediante modelos genéricos de simulación, que sugieren el uso de diversos escenarios para los nodos de abastecimiento [21].

### 3. METODOLOGÍA

Esta investigación se puede definir como un proyecto que utiliza diversas metodologías de la investigación de operaciones aplicadas al subsistema de control de inventarios de la cadena de suministro de sangre. Permitiendo al centro hospitalario de estudio, disponer de las herramientas necesarias para la toma de decisiones más apropiadas referentes a la administración del sistema. El desarrollo de este proyecto se realiza en las siguientes etapas.

#### 3.1 Caracterización de la demanda de los glóbulos rojos por tipo de sangre

3.1.1 Para un primer análisis de demanda se tomaron los registros históricos de las transfusiones diarias realizadas en el centro de salud durante el año 2016. Con un tamaño de muestra de 294 días para los grupos sanguíneos; O+, O-, A+, A-, B+, AB+. Mientras que para los grupos sanguíneos B- Y AB- se tomaron 384 datos, debido a su alta variabilidad.

3.1.2 Para un segundo análisis, se consolida la muestra anterior de datos de forma mensual; la razón obedece a disponer de una ventana de tiempo para la elaboración de los pedidos, los cuales no se pueden hacer de forma diaria, contribuyendo así, a la reducción del costo de ordenamiento.

3.1.3 Se realizan ajustes del comportamiento de demanda a la función de distribución, usando *STAT: FIT* (Aplicativo del software *Promodel*) y el software estadístico *Minitab*.

#### 3.2 Construcción del Modelo Matemático para Programación y Control del Inventario de Sangre en el Centro Hospitalario. Basado en Programación lineal por Metas

3.2.1 De manera inicial se determinan las variables de estudio, las cuales incluyen; Demanda, caducidad, sustitución de unidades (pruebas cruzadas) y adquisición externa.

3.2.2 Posteriormente se construye el modelo mediante programación lineal por metas, donde los objetivos son tratados como restricciones flexibles de forma que cada uno de ellos va a tener una posible desviación o penalidad, tratando de conseguir que estas sean las menores posibles.

#### 3.3 Corrida del Modelo en AMPL (*Mathematical Programming Language*)

Este lenguaje permite aplicar el método preventivo, a partir de la programación lineal por metas, donde se agregan restricciones simples para garantizar que las soluciones de alta prioridad no se degraden (Manual de AMPL).

#### 3.4 Análisis de Resultados Computacionales

3.4.1 Pruebas de validación y operatividad del modelo propuesto.

3.4.2 Análisis final de convergencia de los resultados de la demanda y del modelo matemático con parámetros aleatorios mediante una simulación discreta.

### 4. DISEÑO DEL MODELO DE PROGRAMACIÓN POR METAS

#### 4.1 Justificación del Modelo

El modelo a desarrollar debe representar una alternativa de solución para el problema de planeación y control del sistema de inventarios de sangre del centro médico de estudio. Es fundamental que el modelo considere la condición perecedera de los componentes sanguíneos y garantice el nivel establecido de satisfacción de la demanda, también es importante que en la elaboración del modelo sea considerada la sustitución de los diferentes tipos de sangre del componente glóbulos rojos. Para ello se utiliza un modelo de naturaleza multicriterio con varios objetivos, soportado en la Programación Lineal por Metas, donde se dará un tratamiento de restricciones flexibles a los objetivos, donde cada uno de estos tendrá una penalización que deberá ser la mínima posible.

#### 4.2 Entrada

Son los datos que alimentan el sistema, estos hacen referencia a los registros históricos (294 – 384) de las transfusiones diarias realizadas en el centro de salud.

##### 4.2.1 Notación.

*I*: Tipos de sangre donada

*J*: Tipo de sangre demandada

*T*: Fecha de disponibilidad de la sangre

*U*: Fecha de utilización de la sangre

##### 4.2.2 Parámetros.

$Do_{it}$  = Cantidad de unidades de sangre donada del tipo *i* disponible en fecha *t*.



$D_{ju}$  = Demanda o necesidades de sangre tipo j para ser utilizada en procedimiento de fecha u.

#### 4.2.3 Penalizaciones (P).

$P_{ij}$  = Penalización por uso de sangre donada tipo i en usuario con sangre tipo j

$P_i$  = Penalización por vencimiento de sangre donada tipo i ( $u-t > 42$  días)

$P_j$  = Penalización por adquisición a proveedor externo de la sangre demandada tipo j ( $u-t > 42$  días)

#### 4.2.4 Variables de decisión.

$X_{ijtu}$ : Cantidad de unidades de glóbulos rojos (GR) de donación tipo i, disponibles en el periodo t, para ser utilizadas en procedimientos donde se requiere el tipo j en la fecha de procedimiento u (unidades GR tipo i / periodo t).

$Y_{ju}$ : Cantidad de sangre adquirida a proveedor externo del tipo j para para ser utilizada en el procedimiento en la fecha u (unidades GR tipo j).

$VARIACUM_{ij}$ : Variable de estado para establecer el uso propio o por sustitución de una cantidad de unidades de glóbulos rojos de donación tipo 1 que son utilizadas en procedimientos donde se requiere el tipo j (unidades GR tipo i).

#### 4.2.5 Cálculo de penalizaciones

$P_{ij}$  = Penalización por uso de sangre donada tipo i en usuario con sangre tipo j. Donde se calcula la probabili-

dad de que un evento m (probabilidad de que la sangre requerida sea del tipo j), dado un evento n (probabilidad de que una donación sea del tipo de sangre i).

$P_i$  = Penalización por vencimiento de sangre ( $u-t > 42$  días). Esta penalización es calculada teniendo en cuenta la vida útil de los glóbulos rojos y la distribución de frecuencia de la demanda encontrada en el estudio; a medida que más se impacte la demanda con componentes vencidos, mayor será la penalización.

$P_j$  = Penalización por adquisición a proveedor externo de la sangre demandada tipo j ( $u-t > 42$  días).

Esta penalización es calculada teniendo en cuenta el criterio de la administración del banco de sangre que considera que la adquisición de sangre a través de proveedor externo es cuatro (4) veces más crítica que el vencimiento de la vida útil de los componentes sanguíneos almacenados.

#### 4.3. Formulación del Modelo

4.3.1 Función Objetivo. Es la suma de las tres penalizaciones; Penalización por uso de sangre donada tipo i en usuario con sangre tipo j, Penalización por vencimiento de sangre ( $u-t > 42$  días), Penalización por adquisición a proveedor externo de la sangre demandada tipo j ( $u-t > 42$  días). Ver ecuación 1.

4.3.2 Restricciones. El modelo está sujeto a la satisfacción de la demanda, el balance de unidades sanguíneas, el uso de sangre por sustitución y de restricciones lógicas. Ver ecuaciones 2, 3, 4 y 5.

Función Objetivo: Min. Penalizaciones

$$\begin{aligned} & \sum_{i \in \text{TIPOD}} \sum_{j \in \text{TIPOR}} \sum_{t \in \text{FECHAD}} \sum_{u \in \text{FECHAU}} (X_{ijtu} * P_{ij}) \text{ (Penalización por uso de sangre) } + \\ & \sum_{i \in \text{TIPOD}} \sum_{j \in \text{TIPOR}} \sum_{t \in \text{FECHAD}} \sum_{u \in \text{FECHAU}, u > t + 42} (X_{ijtu} P_i) \text{ (Penalización por vencimiento de sangre) } \\ & + \sum_{j \in \text{TIPOR}} \sum_{u \in \text{FECHAU}} Y_{ju} * P_j \text{ (Penalización por adquisición de sangre a prov. ext.)} \end{aligned} \quad (1)$$

Sujeto a:

Satisfacción de la demanda

$$\sum_{i \in TIPOD} \sum_{t \in FECHAD, t > u - 42} X_{ijtu} + Y_{ju} = D_{ju} \quad \forall j \in TIPOR, u \in FECHAU \quad (2)$$

Balance de sangre

$$\sum_{j \in TIPOR} \sum_{u \in FECHAU, u \geq t} X_{ijtu} \leq DO_{it} \quad \forall i \in TIPOD, t \in FECHAD \quad (3)$$

Uso de sangre

$$\sum_{t \in FECHAD, t > u - 42} \sum_{\substack{u \in FECHAU, u \geq t \\ \in TIPOR}} X_{ijtu} = VARIACUM_{ij} \quad \forall i \in TIPOD, j \in TIPOR \quad (4)$$

Restricciones lógicas

$$\begin{aligned} X_{ijtu} &\geq 0 \quad \forall i \in I, j \in J, t \in T, u \in U \\ X_{ijtu} &\in \text{Enteros} \\ Y_{ju} &\geq 0 \quad \forall j \in J, u \in U \\ Y_{ju} &\in \text{Enteros} \end{aligned} \quad (5)$$

## 5. RESULTADOS

### 5.1 Comportamiento de la Demanda

De acuerdo a la caracterización de la demanda diaria se obtienen que los ocho grupos sanguíneos presentan una alta variabilidad, ajustándose a un comportamiento de demanda errático para cada grupo sanguíneo. Los glóbulos rojos AB- y B- presentan el mayor grado de variabilidad en la demanda con un CVD > 12. Los grupos A-, AB+, B+ y O- presentan un CVD entre 1.3 y 4.7 y en los tipos de sangre A+ y O+, un CVD de 1.13 y 0.94 respectivamente, destacándose el O+ como el de menor variabilidad. Ver figura 1 como ejemplo de la variabilidad de la demanda diaria de los GR del grupo sanguíneo O+.

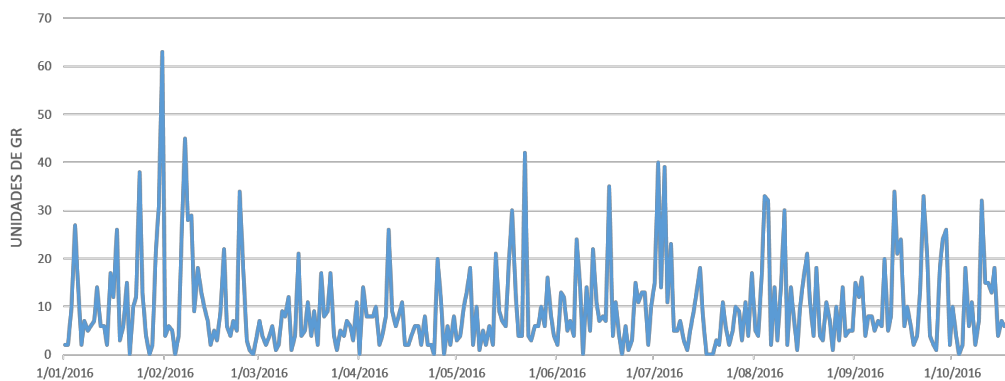


Figura 1. Comportamiento de la demanda de glóbulos rojos de tipo de sangre O+.

Al caracterizar la demanda de manera mensual, el resultado es diferente, los grupos sanguíneos A+, A- y O- presentan un comportamiento estacional con picos mayoritariamente en los meses de febrero y junio. Lo grupos sanguíneos B-, AB- y AB+, mantienen su comportamiento errático, y los grupos B+ y O+, se comportan de manera uniforme. Este estudio es necesario, sin olvidar el carácter perecedero de este tipo de producto.

### 5.2 Ajustes de distribución de probabilidad

Al realizar las pruebas de bondad de ajuste, tanto con el estadístico de prueba chi cuadrado como el K-S (Kolmogorov – Smirnov). Se evidencia que los datos no siguen una distribución de Poisson ni otra conocida, por lo cual, se realiza una distribución

empírica por medio de la función de la transformada inversa, la cual toma como base la generación de números aleatorios para periodos de demanda de máximo 15 días (Debido al carácter perecedero del producto). Esta distribución empírica permitirá plantear una simulación discreta (Excel), recreando múltiples escenarios para medir la operatividad del modelo y conocer la demanda proyectada para el centro hospitalario de referencia.

### 5.3 Resultados del Modelo Computacional

Finalmente, el modelo de programación por metas fue desarrollado a través de AMPL, se logra correr el modelo de 8087 variables a través del neos-server Gurobi, solucionador gratuito para diferentes tipos de modelos matemáticos, destacado por la rapidez en la obtención de resultados [22]. Obteniendo los siguientes resultados computacionales:

En primer lugar, se describen algunos resultados obtenidos referente a la programación de unidades de glóbulos rojos por tipo de sangre que deben estar disponibles en el periodo  $t$  para ser utilizadas en transfusiones en el periodo  $u$ . Es decir, el modelo describe cuantas unidades sanguíneas deben estar disponibles al finalizar la semana (día 7, día 14, día 21, etc.) para que estas unidades puedan ser utilizadas en el día  $u$ , dentro de la semana inmediatamente siguiente en un horizonte de 48 días. Donde al finalizar la primera semana,  $t = 7$ , deben estar disponibles 5 unidades de GR A+ para ser utilizadas en el periodo  $u = 12$ . Ver en la tabla 1. La programación para glóbulos rojos A+.

**Tabla 1.** Programación de unidades de GR A+ para ser usadas en unidades demandadas de GR A+

u/t	1	7	14	21	28	35	42	49
1	2							
2	17							
3	4							
4	3							
5	12							
6	1							
7		2						
10		10						
11	3	3						
12		5						
13		2						
14		1	2					
15		16						
6			24					
17			5					
18			5					
19			7					
21				2				
22				2				
23				4				
24				8				
25				1				
26				12				
28					4			
29					10			
30					10			
32					2			
35						2		
36						19		
37					2			
38						4		
39						2		
40						1		
41					2			
45						6		
46						7		
47						4		
48						4		

A continuación, se presenta el resultado del uso por sustitución de las unidades de glóbulos rojos por tipo de sangre donada y demandada. Ver tabla 2.

**Tabla 2.** Unidades de glóbulos rojos sustituidas

Tipo de donación	Tipo de sangre demandada	Cantidad de unidades sustituidas	Total de unidades usadas	% de Sustitución de unidades
O-	O+	49	555	9%
O+	A+	29	266	11%

Para satisfacer la demanda de glóbulos rojos presentada durante el horizonte de tiempo establecido, hubo necesidad de adquirir 108 unidades de glóbulos rojos al proveedor externo, siendo el tipo O- el más solicitado con 49% de las adquisiciones y el tipo B+ con 42% de las adquisiciones.

En la tabla 3, se describen los resultados obtenidos referentes a las unidades de glóbulos rojos por tipo de sangre y periodo que deben adquirirse a proveedores externos.

**Tabla 3.** Unidades de glóbulos rojos adquiridos a proveedor externo

G.R/Periodo	AB+	A-	B+	O-
2			2	8
3	2		2	
4			8	3
7		2	2	
9				7
10			1	
11		2		
12		2		4
13				1
15			3	
16				12
17			3	
26			2	
28	1			
35			18	
39			1	
44				6
45				12
46			4	
Total	3	6	46	53

Finalmente, el Valor de la Función Objetivo fue: 819,07. Es necesario aclarar que este modelo para la planeación y el control de inventarios de GR, no presenta objetivos numéricos, dado que esta información no fue suministrada como punto de partida por el centro hospitalario.

Con el fin de validar la convergencia de los resultados del modelo se describen las demandas simuladas durante 8 corridas en ciclos de 50 días. Ver tabla 4.

**Tabla 4.** Convergencia en resultados del modelo con demandas simuladas

Ciclos de demanda diaria simulada	Valor FO	% GR adquirido a proveedor	%GR Sustituidos	%GR No sustituidos
1	564,19	6,4	24,7	68.9
2	487,03	8,8	29,1	62.1
3	958,61	22,6	7,8	69.6
4	487,23	10	31	59
5	706,73	17,1	26,7	56.2
6	710,24	18	16,9	65.1
7	819,61	17,4	12,7	69.9
8	817,8	14,1	8,7	77.2

Validada la operatividad del modelo, mediante la simulación discreta, tomando como base la programación de unidades de la tabla 2 y replicándose para cada grupo sanguíneo, se considera el carácter perecedero de los glóbulos rojos, para obtener como resultado final las unidades específicas a ordenar por el centro hospitalario en el periodo  $t$ , para ser utilizados en los próximos quince días. Ver tabla 5.

**Tabla 5.** Cantidad de unidades sanguíneas a solicitar

Grupo Sanguíneo	Unidades a ordenar
A-	5
A+	78
B-	2
B+	14
AB-	1
AB+	3
O-	8
O+	64

## CONCLUSIONES

El estudio desarrollado indica que las unidades de glóbulos rojos demandadas por el hospital presentan un comportamiento errático, corroborado con los altos grados de coeficiente de variación de la demanda, que van desde un CVD de 0,94 para el grupo sanguíneo O+ hasta un CVD de 19,6 para el grupo AB-, confirmando así la complejidad para su administración.

El modelo matemático utilizando la Programación Lineal por Metas, trata la naturaleza multicriterio y compleja del problema de abastecimiento de sangre producido por la variabilidad de la demanda, la escasez, aleatoriedad de la oferta y el almacenamiento de un producto perecedero. Obteniendo una herramienta de soporte para la toma de decisiones que logre garantizar la satisfacción de la demanda, evitando a la vez la caducidad de los componentes sanguíneos y el desabastamiento.

Es necesario reconocer que el modelo puede mejorarse considerando algunas variables no tenidas en cuenta y que complejizan aún más el diseño y la solución presentada. No obstante, se logra dar al hemocentro una forma de abastecer el centro hospitalario con una cantidad de ordenamiento específica para periodos de tiempos de dos semanas.

Los resultados obtenidos en este proyecto pueden servir como referente para hemocentros de centros hospitalarios colombianos de nivel III y IV, pero se debe aclarar que no puede ser usado para obtener respuestas exactas debido al alto grado de variabilidad de los factores como la demanda, los índices bajos de donación en la región y la aleatoriedad de los tipos de sangre, sumado al carácter perecedero del producto en estudio.

Es importante destacar que la utilización de técnicas de ingeniería industrial, como los modelos matemáticos, análisis estadísticos basados en el coeficiente de variación de la demanda, investigación de operaciones y simulación discreta pueden llegar a plantear soluciones a problemáticas que afectan toda la comunidad de una región como es el uso adecuado de un recurso vital.

El modelo desarrollado en esta investigación podría ser usado a futuro como un insumo para la implementación

de un sistema de información integral y modular que permita acceder a la información en tiempo real, logrando la integración y coordinación de todos los bancos de sangre y los hemocentros a nivel regional y nacional.

## REFERENCIAS

- [1] OMS, Organización Mundial de la Salud (2017, Jun 22). Disponibilidad y seguridad de la sangre a nivel mundial, [Online]. Disponible en: <http://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/blood-safety-and-availability>
- [2] INS, Instituto Nacional de Salud (2013, Dic 31). Informe de Red Nacional de Bancos de Sangre y Servicios Transfusionales del Instituto Nacional de Salud, [Online]. Disponible en <https://www.minsalud.gov.co/sites/rid/Lists/BibliotecaDigital/RIDE/IA/INS/ins-informe-anual-red-sangre-2014.pdf>
- [3] The World Bank (2017). Total population, [Online]. Disponible en <https://data.worldbank.org/indicador/SP.POP.TOTL>
- [4] El País.com.co. (2017, Dic 12). Alerta por disminución de reservas de sangre en hemocentros de Cali, [online]. Disponible en: <http://www.elpais.com.co/valle/hemocentros-de-cali-en-alerta-por-disminucion-en-reservas-de-sangre.html>
- [5] El País.com.co. (2018, Ene 12). Preocupación por baja donación de sangre en Cali, [online]. Disponible en: <http://www.elpais.com.co/cali/preocupacion-por-baja-donacion-de-sangre-en.html>
- [6] J. Arboleda, "Modelo de inventarios para la administración de la cadena de suministro en el banco de sangre de una clínica de la ciudad de Santiago de Cali", tesis de Maestría, Ingeniería, Universidad del Valle, Santiago de Cali, 2013.
- [7] M. Lichtman, J. Prchal, K. Kaushansky, M. Levi, L. Burns y J. Armitage, "Transfusión medicine", en *Williams Hematology*, Mcgraw Hill: Estados Unidos, 2000, pp. 1647-1659.
- [8] B. Brown, "Basic laboratory Techniques" En *Hematology: Principles and procedures*, Lea & Febiger: Estados Unidos, 1999, pp. 16-32.
- [9] República de Colombia, Ministerio de Protección Social (2011, Dic 26) Política Nacional de Sangre, [Online]. Disponible en: <https://www.invima.gov.co/politicas/177-politica-nacional-de-sangre.html>
- [10] R. Ballou, "Decisiones sobre políticas de inventarios," en *Logística Administración de la cadena de suministro*, E. Quintanar, Pearson Education: México, 2004, pp. 412-423.

- [11] C. Vidal, "Introducción a los pronósticos de demanda," en *Fundamentos de gestión de inventarios*, Universidad del Valle – Facultad de ingeniería, Universidad del Valle: Colombia, 2005, pp. 33-46.
- [12] B.F. Salcedo Moncada, M. Ramírez Fernández y J. Arboleda, "Pronóstico de componentes sanguíneos en un hemocentro de la ciudad de Santiago de Cali", In VIII Encuentro de investigación formativa, Universidad Pontificia Bolivariana, Palmira, Colombia, 2017, pp. 107-118.
- [13] M. Valencia, J. Correa y F. Díaz, "Modelo de inventarios que utiliza el modelo lineal dinámico bayesiano para el pronóstico de demanda", *Revista Ingeniería Investigación y Desarrollo*, vol. 15, no. 1, pp. 39-47, julio 2015. DOI: <https://doi.org/10.19053/1900771X.3937>
- [14] K. Katsliak y S. Brailfor, "Using simulation to improve the blood supply chain", *The Journal of the Operational Research Society Oxford*, vol. 58, no. 2, pp. 219-228, diciembre 2007. DOI: <https://doi.org/10.1057/palgrave.jors.2602195>
- [15] A. Pereira, "Blood inventory management in the type and screen área", *Vox Sanguinis*, vol. 89, no. 4, pp. 245-250, octubre 2005. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.14230410.2005.0070.x>
- [16] V. Fano y A. Longres, "Inventario mínimo de componentes sanguíneos en un servicio de hemoterapia de la ciudad de La Habana", *Revista Cubana de medicina militar*, vol. 27, no. 1, pp. 39-43, 1998.
- [17] J. Arboleda, "Mathematical and stochastic models for inventory control in blood banks: Literature Review" *Inventum*, vol. 12, no. 22, pp. 53-65, junio 2017.
- [18] Z. Hosseinifard y B. Abbasi, "The inventory centralization impacts on sustainability of the blood Supply chain", *Computers & Operations research*, vol. 89, no. C, pp. 206-212, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cor.2016.08.014>
- [19] A. Hendalianpour, "Mathematical Modeling for Integrating Production – Routing Inventory Perishable Goods: A Case Study of Blood Products en Iranian Hospitals", en *Dynamics in Logistics*, M. Freitag, H. Kotzab, J. Pannek, Dynamics in Logistics LDIC 2018. Lecture Notes in Logistics: Germany, 2018, pp. 125-136. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-74225-0\\_16](https://doi.org/10.1007/978-3-319-74225-0_16)
- [20] L. Duong, L. Wood, & W. Wang, "A multi-criteria inventory management system for perishable & substitutable products", *Procedia Manufacturing*, vol. 2, pp. 66-76, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2015.07.012>
- [21] J. Blake y M. Hardy, "A generic modelling framework to evaluate network blood management policies: The Canadian Blood Services experience", *Operations Research for Health Care*, vol. 3, no. 3, pp. 116-128, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.orhc.2014.05.002>
- [22] Gurobi Optimization. (2018, May 1). Using AMPL with Gurobi, [online]. Disponible en: <http://www.gurobi.com/products/modeling-languages/ampl>

Cómo citar este artículo:

G.A. Jiménez-Tovar, and M. Parra-Pinilla, "Lixiviación de cobre contenido en tarjetas de computador PCB para la extracción de metales preciosos", *Rev. Ing. Investig. Desarro.*, vol. 18 (2), pp. 15-21, Julio. 2018.

## LIXIVIACIÓN DE COBRE CONTENIDO EN TARJETAS DE COMPUTADOR PCB PARA LA EXTRACCIÓN DE METALES PRECIOSOS

**Lixiviation of copper content in pcb computer cards for the extraction of precious metals**

Ginna Alejandra Jiménez Tovar <sup>1</sup>, Mario Parra Pinilla <sup>1</sup>

<sup>1</sup>MSc. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (Tunja, Colombia). [ginna.jimenez@uptc.edu.co](mailto:ginna.jimenez@uptc.edu.co)

*(Recibido noviembre 6 de 2017 y aceptado junio 25 de 2018)*

### Resumen

La recuperación de oro y plata desde residuos electrónicos es una alternativa amigable con el medio ambiente que puede complementar la producción industrial de ellos, usualmente obtenidos a partir de menas naturales y también para promover la reducción de dichos residuos. Como paso previo a la recuperación de estos metales es necesario extraer el cobre contenido en ellos y lograr así una mayor recuperación. En el presente estudio se analizó la extracción de cobre a partir de tarjetas de computador PCB. Se inició con una caracterización de los metales de interés para luego estudiar su comportamiento en el proceso de disolución. A continuación, se realizó un proceso de lixiviación con ácidos inorgánicos a condiciones ambientales durante seis horas y agitación mecánica de 300 RPM. Al finalizar, se eligió la lixiviación con mayor porcentaje de cobre extraído y se hizo una caracterización de los residuos donde se muestra que el contenido de cobre disminuyó desde 27,09% hasta 1.48%. Así mismo, la concentración de oro varió desde 131,29 g/ton hasta 345,9g/ton y la de la plata desde 310 g/ton hasta 864,8 g/ton. Para comprobar el proceso de limpieza de cobre se llevo a cabo un proceso de lixiviación con soluciones de tiourea obteniéndose resultados de 60,9% y 96,06% para plata y oro, respectivamente.

**Palabras clave:** ácidos inorgánicos, cobre, limpieza, lixiviación, PCB.

### Abstract

The recovery of gold and silver from electronic waste is a friendly alternative to the environment that can complement the industrial production of them, usually obtained from natural ores and also to promote the reduction of such waste<sup>1</sup>. As a step prior to the recovery of these metals it is necessary to extract the copper contained in them and thus achieve a greater recovery. In the present study, the extraction<sup>2</sup> of copper was analyzed from PCB computer cards. It began with a characterization of the metals of interest to then study their behavior in the dissolution process. Next, a process of leaching with inorganic acids was carried out at ambient conditions for six hours and mechanical agitation of 300 RPM. At the end, leaching was chosen with the highest percentage of copper extracted and a characterization of the waste was made showing that the copper content decreased from 27.09% to 1.48%. Likewise, the concentration of gold varied from 131.29 g / ton to 345.9 g / ton and that of silver from 310 g / ton to 864.8 g / ton. To verify the copper cleaning process, a leaching process was carried out with thiourea solutions, obtaining results of 74.79% and 64.8% for silver and gold, respectively.

**Key words:** inorganic acid, copper, cleaning, leaching, PCB.

### 1. INTRODUCCIÓN

El desarrollo tecnológico en los equipos eléctricos y electrónicos que se ha generado por la evolución e innovación de los últimos años está ayudando al impulso de nuevas tecnologías para la industria. [1]

Sin embargo, se ha aumentado la cantidad de residuos electrónicos en hogares y empresas al punto que, en Colombia hasta el año 2013, se habían generado más de 143.000 toneladas, y para el año 2016 ascendió a 275.000 toneladas [2 - 3]. Este hecho ha causado inconvenientes de contaminación ambiental debido a

que los elementos químicos que contienen, poliméricos, cerámicos y metálicos, especialmente los metales pesados, como el plomo y el cadmio, son perjudiciales para el planeta y en consecuencia para la salud de los seres humanos. [4]

La creciente recolección y su consecuente acumulación ha planteado la necesidad de crear procesos alternativos para intentar la recuperación de metales comunes (Cu, Fe, Ni), metales preciosos (Au, Ag) y otros elementos químicos de interés tecnológico. Dichas metodologías, enmarcadas dentro de una metalurgia secundaria, podrían constituirse en un proceso alternativo para complementar el uso de las menas naturales para la recuperación de tales metales. Además, se realiza un mejor tratamiento de los materiales antropogénicos evitando que lleguen a vertederos donde se convierten en un problema ambiental. [5-8]

En los residuos electrónicos PCB (Printed Circuit Board) el metal que se presenta en mayor proporción es el cobre, el cual aparece en cantidades cercanas al 25% de los valores metálicos totales. En algunos estudios de recuperación de cobre, en procesos de lixiviación con ácidos inorgánicos, se han obtenido resultados hasta del 98% de extracción. [9]

Por otra parte, al comparar las leyes de oro y plata en los minerales tradicionales con los contenidos generalmente mostrados por los residuos PCB, la diferencia es bastante notoria. Tal hecho motiva para que se intente su recuperación desde tales materiales. Sin embargo, para lograr su mejor extracción, se hace necesario eliminar los metales comunes ya descritos y evitar así el consumo extra de reactivos que se generaría por la presencia de ellos. [9-11]

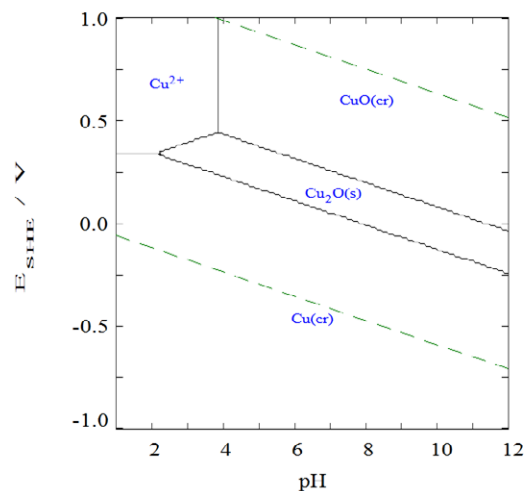
El objetivo del presente estudio consiste entonces en limpiar los residuos electrónicos PCB, extrayendo el cobre presente en ellos, mediante disoluciones o lixivaciones realizadas a condiciones ambientales con ácidos inorgánicos utilizados como agentes disolventes. A partir de los resultados de este trabajo, se busca establecer las condiciones más recomendables para efectuar pretratamientos que permitan la posterior recuperación de metales preciosos.

#### *Análisis Termodinámico*

La mayoría de las reacciones en hidrometalurgia pueden escribirse para que muestren la extensión en que ellas ocurren o pueden ocurrir, dependiendo del pH de las

soluciones y el potencial oxido-reducción. Al graficar en un plano de coordenadas estas variables se obtiene el diagrama de áreas predominantes o Pourbaix, que permite realizar los análisis adecuados para establecer si una reacción ocurrirá o no y en qué condiciones. [12]

En la figura. 1, se muestra el diagrama para el cobre, donde se presenta el análisis termodinámico para cada una de las especies. La información termodinámica se obtuvo de la base de datos NIST 46, versión 8.0 (NIST, 2004) y se integró en la suite de software MEDUSA (Diagramas de equilibrio usando algoritmos simples).



**Figura 1.** Diagrama de predominancia Eh/pH a 25° C del sistema Cu-H<sub>2</sub>O [13]

Al analizar el diagrama de predominancia para el cobre, el proceso de lixiviación se podría realizar en un intervalo de pH 0 a 4.0 y el metal sería soluble en potenciales mayores a 0.3 V.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1 Preparación del Material

Una muestra de 1400 g de tarjetas de diferentes tipos de computadores, computadores portátiles y de escritorio, fue sometida a reducción de tamaño utilizando un molino de martillos de alto impacto que garantizara su rompimiento dada la alta cohesión mostrada por esta clase de material, figura 2. Finalizada esta operación, se realizó un análisis de distribución de tamaño de partícula de los diferentes materiales obtenidos, los cuales se muestran en la figura 3.

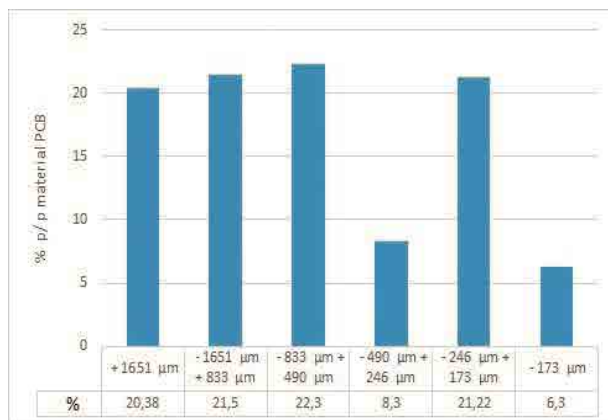




a)

b)

**Figura 2.** Tarjetas de computador PCB. a) sin triturar b) trituradas



**Figura 3.** Distribución de tamaño de partícula

Dados estos resultados se seleccionó como muestra para trabajo, el tamaño entre los rangos -833 +490 µm por ser el tamaño en que se acumula mayor porcentaje en peso de residuo.

Las soluciones para lixiviación o disolución de los valores metálicos contenidos en las muestras de trabajo fueron preparadas a partir de ácidos grado analítico (ácido clorhídrico 37% J.T Baker; ácido sulfúrico 97% Honeywell y ácido nítrico 65% Emsure). Para la lixiviación de los metales preciosos oro y plata se utilizó tiourea concentrada de grado analítico marca Panreac y peróxido de hidrógeno concentrado 30% J.T Baker Las diluciones necesarias para ajustar las concentraciones empleada durante los experimentos fueron preparadas con agua destilada y desionizada.

## 2.2. Digestión

Para la cuantificación de los valores metálicos de interés, se hicieron digestiones con soluciones de agua regia a 80°C, con agitación mecánica a 300 rpm durante tres horas. Una vez frías las soluciones se filtró y se hicieron las diluciones necesarias para realizar la cuantificación de metales disueltos en un equipo de caracterización de absorción atómica Perkin Elmer 3110.

## 2.3. Procedimiento experimental

Muestras de 20 g de los diferentes tamaños de partícula fueron sometidas a disolución empleando soluciones de ácido nítrico, ácido sulfúrico y ácido clorhídrico. Estos ensayos se realizaron a temperatura ambiente (18°C) en matraces de vidrio con agitación mecánica constante de 300 rpm. Alícuotas de las diferentes soluciones fueron tomadas a diversos tiempos para evaluar el grado de disolución de cobre. Los valores experimentales reportados, tanto en forma numérica y gráfica, corresponden a las medias aritméticas de los resultados obtenidos por triplicado a las condiciones específicas de operación.

## 3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Cada una de las muestras escogidas se sometió a la acción de agua regia, como se explicó anteriormente, para producir la disolución completa de los diferentes metales contenidos en ellas. Los elementos químicos

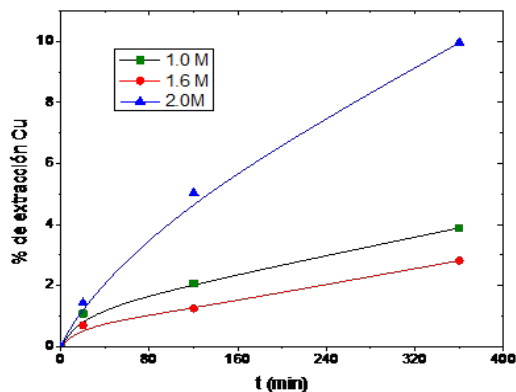
valorados, que son de interés para este trabajo, fueron cobre, oro y plata.

**Tabla 1.** Contenido de metales respecto al tamaño medio de partículas

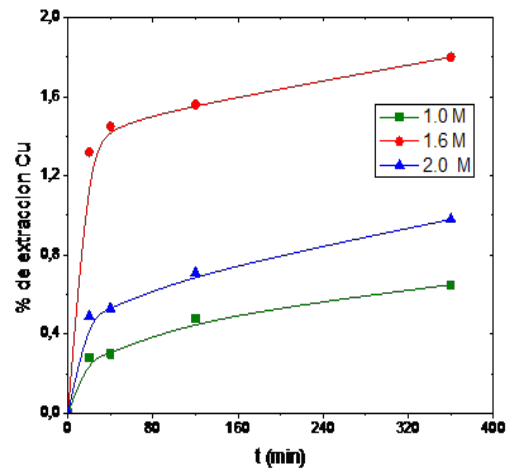
Metales	+1651 µm	-1651 +833 µm	-833 +490 µm	-490 +246 µm	-246 +173 µm
Au (g/t)	105	1269	131	59	60
Ag (g/t)	4567	2440	310	2274	180
Cu (Kg/ton)	171.0	488.1	270.9	113.0	141.3

Como puede observarse en la tabla 1, la distribución de los metales no es homogénea en cada tamaño de partícula. Esto sucede por el comportamiento mecánico diferenciado de los distintos componentes de los residuos, que en algunos momentos pueden pulverizarse dada su fragilidad o laminarse según el carácter metálico que posean. Puede deberse también a la heterogeneidad en la composición de las tarjetas de reciclaje que se emplearon puesto que son de diferentes proveedores. [15] Resulta importante resaltar que esta etapa de preparación física podría emplearse como un método para preseleccionar los residuos de acuerdo con el metal que se considere de interés.

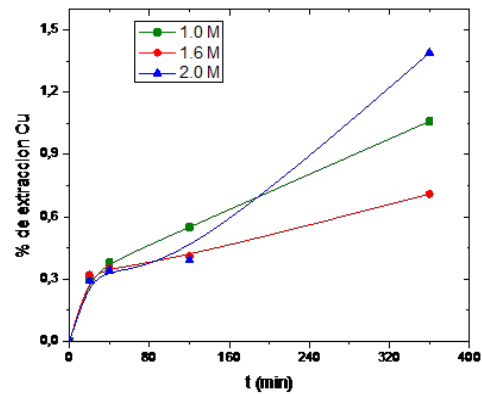
Las muestras fueron sometidas a tratamiento con las soluciones ácidas ya mencionadas para producir la disolución selectiva del cobre contenido en ellas. Los resultados de estas lixiviaciones pueden observarse a continuación en la figura 4.



a)



b)



c)

**Figura 4.** Efecto de las concentraciones molares con ácidos inorgánicos desde tarjetas de computador PCB para la disolución de cobre. Todas las pruebas fueron realizadas con agitación mecánica de 300 rpm, temperatura ambiente (18 °C) y en un tiempo total de 360 minutos. (a) Proceso de lixiviación con HNO<sub>3</sub>, (b) Proceso de lixiviación con HCl (c) Proceso de lixiviación con H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

En las gráficas anteriores se indica que, en la mayoría de los procesos de extracción, se obtuvo un mayor porcentaje de disolución con las concentraciones más altas. Este efecto ocurre debido a que las tarjetas de computador contienen otro tipo de metales base como hierro, plomo, níquel y se disuelven a potenciales menores a 0.25 V, según el diagrama de Pourbaix del cobre, figura

1. Por esta razón la presencia de estos metales hace necesaria la utilización de concentraciones para los ácidos que estén por encima de la cantidad estequiométrica para la disolución del cobre y de esta manera alcanzar un mayor porcentaje de cobre disuelto.

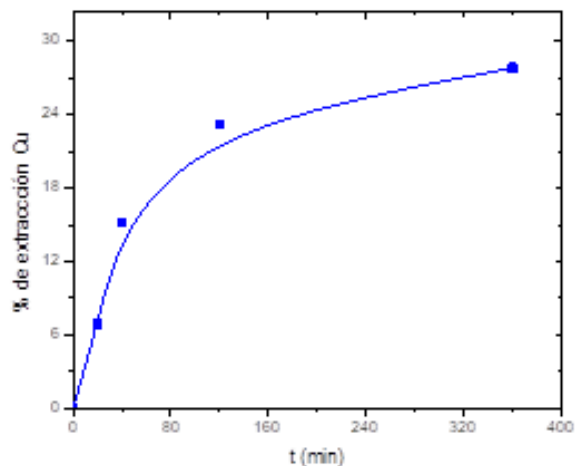
El  $\text{HNO}_3$  es el reactivo con mayor porcentaje de extracción de cobre, en comparación a los otros dos reactivos  $\text{HCl}$  y  $\text{H}_2\text{SO}_4$ . Esto puede suceder por la capacidad de disolución del complejo formado entre el ácido nítrico y el cobre, lo cual se observa al analizar los logs K, constante de disolución, de cada uno de los complejos formados con los otros reactivos, tabla 2, donde se muestra que el ácido nítrico tiene una alta capacidad de disolución con el cobre.

**Tabla 2.** Datos termodinámicos del proceso de lixiviación de cobre con ácidos inorgánicos [14].

REACCIÓN	Log K
$2\text{Cu} + 4\text{HNO}_3 + \text{O}_2 = 2\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 + 2\text{H}_2\text{O}$	83.984
$2\text{Cu} + 2\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{O}_2 = 2\text{CuSO}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$	72.313
$4\text{Cu} + 4\text{HCl} + \text{O}_2 = 4\text{CuCl}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$	76.375

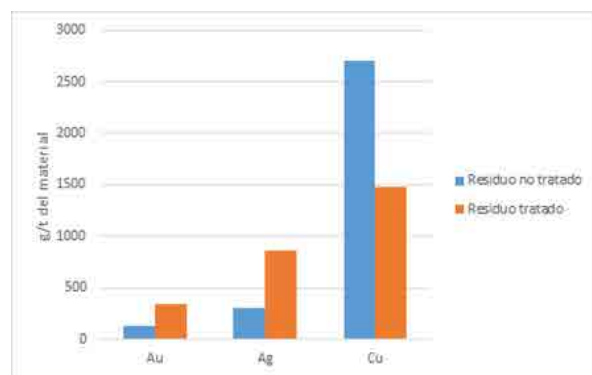
La mayoría de los resultados obtenidos en las lixiviaciones de cobre con los tres ácidos inorgánicos son relativamente bajos y no se logra obtener la extracción completa del metal. Este efecto ocurre debido a que metales como el cobre, se encuentran en forma aleada en los residuos electrónicos; algunos autores [9,16-17] sugieren que es necesario trabajar procesos de lixiviación oxidativa o utilizar mezclas de diferentes reactivos para la extracción completa de este metal.

Para mejorar el porcentaje de extracción del cobre, se realizó un proceso de lixiviación con ácido nítrico 2.0 M mezclado con peróxido de hidrógeno 0.5 M. Como se muestra en la figura 5, efectivamente si fueron más altos los porcentajes de extracción para el cobre en un tiempo de 400 minutos. Sin embargo, al observar la gráfica se indica que el proceso de lixiviación continúa, lo cual muestra que la reacción que controla el proceso es lenta y para obtener mayores resultados es necesario utilizar un tiempo superior a los 360 minutos.



**Figura 5.** Proceso de lixiviación de cobre con  $\text{HNO}_3$  2.0 M y  $\text{H}_2\text{O}_2$  0.5 M. Se utilizó una relación sólido- líquido de 20 gramos por litro de solución, velocidad de agitación de 300 rpm temperatura de  $18^\circ\text{C}$  y presión de 535 mm Hg.

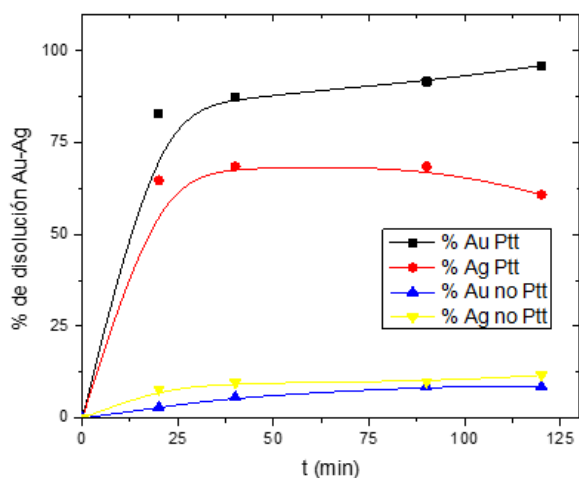
Para valorar el efecto de la eliminación de cobre y otros elementos metálicos no cuantificados en este trabajo, pero que, si están contenidos en los residuos ensayados, se procedió a analizar los sólidos lixiviados de los procesos de disolución ejecutados. El análisis de este proceso se presenta en la figura 6.



**Figura 6.** Comparación de contenidos metálicos de interés en residuos tratados y no tratados

Este material procesado, resulta apropiado para utilizarlo como materia prima en la recuperación de oro y plata de los residuos PCB, puesto que los elementos consumidores de reactivos empleados en la disolución de metales preciosos, especialmente el cobre, se han reducido de manera notoria.

Para comprobar los resultados obtenidos de la eliminación del cobre, se realizó el proceso de extracción de oro y plata con soluciones de tiourea. En la figura 7 se observa que es más efectivo el proceso de la eliminación del cobre para la posterior recuperación de metales preciosos como oro y plata.



**Figura 7.** Proceso de lixiviación de oro y plata con Tiourea 0.2 M activada con  $H_2O_2$ . Se utilizó una relación sólido- líquido de 200 gramos por litro de solución, velocidad de agitación de 300 rpm temperatura de  $18^\circ C$  y presión de 535 mm Hg, pH 1.5. a) Proceso de lixiviación sin limpieza de cobre. (No Ptt) y con limpieza de cobre (Ptt).

## CONCLUSIONES

El cobre es el metal que se encuentra en mayor proporción en las tarjetas electrónicas PCB con un 27.09%. El oro y la plata se encuentran en proporciones con 131 g/ton y 310 g/ton respectivamente.

Además del cobre, los ácidos inorgánicos también disuelven otros elementos metálicos contenidos en los residuos como hierro, níquel, plomo, zinc, etc. generando en consecuencia un aumento en la concentración de oro desde 131,29 g/ton a 345,9 g/ton y en la plata desde 310 g/ton a 864,8 g/ton.

Este material procesado resulta muy adecuado para intentar la posterior recuperación de oro y plata, como se demostró en el proceso de lixiviación de residuos con soluciones de tiourea. En el proceso de lixiviación sin extracción de cobre, se consigue el 11.71% de recuperación de plata y 8.63% para oro, mientras que,

en la lixiviación de residuos con extracción de cobre, la recuperación aumenta a 60.9% para plata y 96.06% para oro.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo de investigación se desarrolló en el grupo de investigación de Metalurgia No Ferrosa de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Tunja, Boyacá. Se agradece a la Dirección de Investigaciones de la UPTC por los recursos económicos aportados para su realización.

## REFERENCIAS

- [1] R. Cayumil, R. Khanna, R. Rajarao, P.S. Mukherjee, V. Sahajwalla, "Concentration of precious metals during their recovery from electronic waste", *Waste Management*, vol. 57, pp 121-130, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2015.12.004>
- [2] Este año Colombia tendrá 143.000 toneladas de residuos electrónicos. [En línea]. *El Tiempo*. Bogotá D.C. 28, agosto, 2015. [Consulta: enero 2015]. Mensaje archivado en <http://www.eltiempo.com/archivo/documento/CMS-13156235>.
- [3] El planeta tiro a la basura 180 billones de pesos. [En línea]. *El Espectador*. Bogotá D.C. 14, diciembre, 2017. [Consulta: mayo 2018]. Mensaje archivado en <https://www.elespectador.com/noticias/medio-ambiente/el-planeta-tiro-la-basura-180-billones-de-pesos-articulo-728484>.
- [4] Y. Reyes, I. Vergara, O. Torres, M. Diaz-Lagos, E.E. González-Jimenez, "Contaminación por metales pesados: Implicaciones en salud, ambiente y seguridad alimentaria", *Revista Ingeniería Investigación y Desarrollo*, vol. 16 (2), pp. 66-77, julio, 2016. DOI: <https://doi.org/10.19053/1900771X.v16.n2.2016.5447>
- [5] J. Huang, M. Chen, H. Chen, S. Chen, Q. Sun, "Leaching behavior of copper from waste printed circuit boards with Brønsted acidic ionic liquid", *Waste Management*, vol. 34, pp. 483-388, 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2013.10.027>.
- [6] S. Yousef, M. Tatariants, R. Bendikiene, G. Denafas, "Mechanical and thermal characterizations of non-metallic components recycled from waste printed circuit boards", *Journal of Cleaner Production*, vol. 167, pp. 271-280, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.08.195>.

- [7] A. Kumar, M. Holuszko, T. Janke, "Characterization of the non-metal fraction of the processed waste printed circuit boards", *Waste Management*, vol. 75, pp. 94-108, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.02.010>.
- [8] L. Diaz, T. Lister, "Economic evaluation of an electrochemical process for the recovery of metals from electronic waste", *Waste Management*, vol. 74, pp. 384-392, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.11.050>
- [9] H. Lee, B. Mishra, "Selective recovery and separation of copper and iron from fine materials of electronic waste processing", *Minerals Engineering*, vol. 123, pp. 1-7, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.04.021>
- [10] S. Fogarasi, F. Imre-lucaci, Á. Imre-lucaci, P. Ilea, "Copper recovery and gold enrichment from waste printed circuit boards by mediated electrochemical oxidations", *Journal of Hazardous Materials*, pp 215-221, 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2014.03.043>.
- [11] Y. Lu, Z. Xu, "Precious metals recovery from waste printed circuit boards: A review for current status and perspective", *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 113, pp. 28-39, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.05.007>.
- [12] M. Parra. "Los diagramas de Pourbaix" en *Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia*, 1989, pp. 1-4.
- [13] NIST, 2004. Critically Selected Stability Constants of Metal Complexes. NIST Standard Reference Database 46, Version 8.0.
- [14] Robinson Torres, Gretchen T. Lapidus. "Copper leaching from electronic waste for the improvement of gold recycling", *Waste Management*, vol. 57, November 2016. pp 131 – 139. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2016.03.010>
- [15] Base de datos plataforma HSC CHEMISTRY 5.11 for Windows.
- [16] I. Birloaga, I. Michelis, F. Ferella, M. Buzatu, F. Veglio, "Study on the influence of various factors in the hydrometallurgical processing of waste printed circuit boards for copper and gold recovery", *Waste Management*, vol. pp 935-941, 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2013.01.003>
- [17] E.Y. Yacizi, H. Deveci, "Ferric sulphate leaching of metals from waste printed circuit boards", *International Journal of Mineral Processing*, vol. 133, pp. 39-45, 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.minpro.2014.09.015>.

# ANÁLISIS Y COMPARATIVO DE LOS AMPLIFICADORES ÓPTICOS SOA, EDFA Y RAMAN

## Análisis y comparativo de los amplificadores ópticos soa, edfa y raman

Sergio Moreno<sup>1</sup>, Daniel Torres<sup>1</sup>, Gustavo Puerto<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Esp. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (Tunja, Colombia). sergioalfredo.moreno@uptc.edu.co, wilmer.torres@uptc.edu.co.

<sup>2</sup>PhD. Universidad Distrital Francisco José de Caldas (Bogotá-Colombia). gapuerto@udistrital.edu.co

*(Recibido septiembre 21 de 2017 y aceptado noviembre 08 de 2017)*

### Resumen

En este documento, se expone de manera general la estructura y el funcionamiento de los amplificadores ópticos SOA, EDFA y Raman, además, se presenta una comparación entre las tecnologías ópticas mencionadas anteriormente, en donde se logran identificar los campos de acción de cada una de ellas, y las ventajas de los modelos híbridos de amplificación óptica. Asimismo, se abordará el tema de las no linealidades y su contribución.

**Palabras clave:** Amplificación; atenuación; fibra óptica; fotónica; óptica.

### Abstract

En este documento, se expone de manera general la estructura y el funcionamiento de los amplificadores ópticos SOA, EDFA y Raman, además, se presenta una comparación entre las tecnologías ópticas mencionadas anteriormente, en donde se logran identificar los campos de acción de cada una de ellas, y las ventajas de los modelos híbridos de amplificación óptica. Asimismo, se abordará el tema de las no linealidades y su contribución.

**Keywords:** Amplificación; atenuación; fibra óptica; fotónica; óptica.

## 1. INTRODUCCIÓN

Las telecomunicaciones han tenido una gran evolución y crecimiento en las últimas décadas, en los últimos años se ha visto un aumento incesante en la transmisión de información en los sistemas de comunicaciones, que han forzado la creación de mecanismos capaces de soportar y gestionar estos grandes volúmenes de datos. Con el paso del tiempo, la transferencia de información se convirtió en un factor crítico, surgió la necesidad de un medio guiado que tuviera la capacidad de soportar el crecimiento exponencial del flujo de información. Por lo anterior, se optó por la tecnología óptica, la cual permite el envío de señales fotónicas a una velocidad mucho mayor que con cualquier otro sistema, brinda seguridad en la transmisión de datos, posee inmunidad a interferencias electromagnéticas, entre otras características. En este sentido, la fotónica se ha posicionado como la tecnología dominante, pues permite explotar

el ancho de banda de la fibra óptica, a tal punto que en la actualidad se habla de redes y sistemas todo-ópticos [1][2].

A pesar que un sistema de comunicaciones óptico presenta una serie de ventajas, después de que una señal ha viajado una distancia considerable, ésta se atenúa debido a las

pérdidas de potencia a lo largo de la fibra, a imperfecciones de la misma en el proceso de fabricación, o a curvaturas, en

ese punto dicha señal requiere un incremento de en el nivel de potencia. Tradicionalmente, la señal óptica era convertida a una señal eléctrica, amplificada eléctricamente y convertida de regreso en una señal óptica. Por el contrario, un amplificador óptico permite incremen-

tar el nivel de potencia de la señal en el dominio óptico, sin necesidad de pasar la señal al dominio eléctrico (conversión opto-electrónica) [3]. El amplificador óptico proporciona una solución más simple al problema de la atenuación y puede ser usado independientemente del tipo de modulación y del ancho de banda, además es un dispositivo bidireccional y permite el trabajo en sistemas con multiplexación por división de longitud de onda [4][5].

La invención del láser de semiconductor en la década de 1960, permitió realizar los primeros estudios del amplificador óptico de semiconductor, comúnmente conocido como SOA. Su desarrollo se centró en un dispositivo de amplificación óptica que se desempeñaba alrededor de los 820nm, pues en esa década no había láseres ni receptores ópticos que operaran en segunda y tercera ventana. A pesar de esto, a mediados de los 80 se dieron los primeros avances de un SOA que operaba en las regiones de 1300nm y 1550nm [2]. Fue entonces, cuando en la Universidad de Southampton en el año de 1985, se acuñó el concepto de fibras ópticas dopadas con iones de tierras raras (Nd, Er, Pr, Ho, Tm), dando inicio a una nueva generación de fibras, las cuales serían usadas como un novedoso modelo de amplificador óptico. El EDFA (amplificador óptico de fibra dopada con erbio), presentó un interés especial debido a que el ion Er<sup>3+</sup> posee una transición alrededor de los 1.536μm, lo cual permite la amplificación de las señales en los sistemas de comunicaciones ópticas modernos [6].

Las distintas tecnologías emergentes de amplificación óptica propulsaron una serie de avances importantes en este campo, pocos años después del surgimiento del EDFA, se logró la transmisión de pulsos ópticos que conservaban su forma al propagarse a lo largo de una fibra óptica sin presentar pérdidas, contrarrestando el efecto de la dispersión por medio de no linealidades. En 1988 un experimento de laboratorio consiguió la transmisión de datos a una distancia de aproximadamente 4000 km, compensando las pérdidas de la fibra mediante la dispersión estimulada de Raman. Desde entonces, se han aprovechado efectos no lineales en la fibra óptica para el desarrollo de tecnologías laser y de amplificación Raman [7].

Este artículo presenta un paralelo entre las tres tecnologías de amplificación óptica mencionadas anteriormente, en donde se señalan sus características principales, ventajas y desventajas, permitiendo al lector

identificar los campos de acción asociados a cada una de ellas, adicionalmente se pretende indicar la viabilidad de la combinación de dos tecnologías fotónicas de amplificación, con el fin de establecer si los modelos ópticos híbridos presentan algún tipo de ventaja respecto a los modelos ópticos convencionales, se encuentra que ningún modelo de amplificación es ideal, pero ciertas características específicas permiten posicionar determinada tecnología de amplificación óptica como la dominante en los sistemas de comunicación óptica modernos, cabe resaltar que el estudio realizado destaca que las no linealidades pueden contribuir en un sistema óptico, sin limitarse a la amplificación.

## 2. AMPLIFICADORES ÓPTICOS SOA, EDFA Y RAMAN

*“Se le considera un amplificador óptico, cuando la señal no necesita ser convertida a una señal eléctrica, amplificarla y volverla óptica nuevamente” [8].*

### 2.1 Amplificador SOA

Un SOA es un dispositivo opto-electrónico que genera un aumento en la amplitud de la señal fotónica que se propaga a través de él, dicha señal pasa de la fibra óptica al amplificador, es amplificada y finalmente regresa a la fibra. Para que esto suceda es necesario que el dispositivo se encuentre en región activa, además de estar polarizado de forma correcta de acuerdo a una corriente eléctrica. En la figura 1 se observa el diagrama esquemático de un SOA[2].

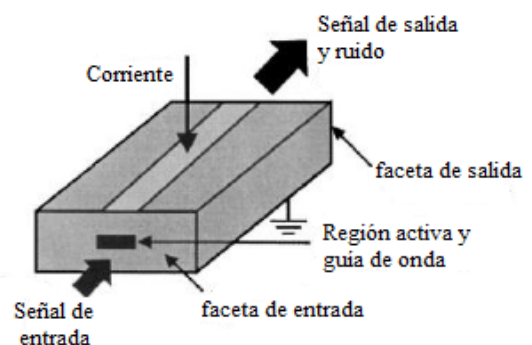
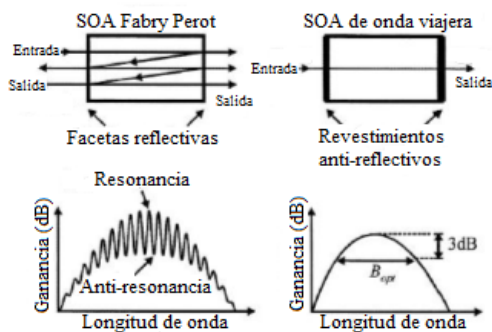


Figura 1. Esquema del amplificador SOA [2].

Una de las desventajas de los amplificadores ópticos de semiconductor es el nivel de ruido que posee la señal fotónica a la salida del dispositivo, este factor es causado por el propio SOA y no se puede eliminar completamente [2].

Los SOA se dividen en dos arquitecturas, amplificador óptico de semiconductor de caras reflectantes (*Fabry Perot* o *FP-SOA*) y amplificador óptico de semiconductor de onda viajera (*OV-SOA*). La diferencia radica en que el primero tiene reflexiones muy significativas y variantes en sus caras. Gracias a sus revestimientos anti-reflectivos, la reflexión en el *OV-SOA* es despreciable. Además, el *OV-SOA* no es tan sensible a las variaciones en la corriente de polarización, polarización de la señal y temperatura de trabajo. En la figura 2, se expone la estructura de los amplificadores mencionados anteriormente y el comportamiento de la ganancia para cada caso, de acuerdo a la longitud de onda [2].



**Figura 2.** Comparación de los FP-SOA y TW-SOA, Diagrama de estructura respecto a la señal y espectros de ganancia [2].

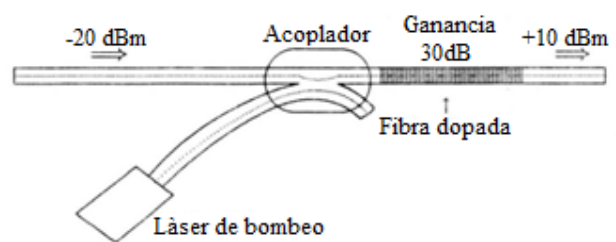
En un amplificador óptico de semiconductor, una fuente de corriente externa es la encargada de inyectar electrones con el fin de generar un mecanismo de emisión estimulada, el cual es el principio de funcionamiento del SOA para la amplificación. Al incidir un fotón en el semiconductor ocurre lo que se denomina recombinación estimulada, como consecuencia, un electrón pasa de la banda de conducción a la banda de valencia, generando un nuevo fotón con la misma frecuencia y fase del fotón que inició el proceso, al ocurrir esto se tienen dos fotones idénticos, pues el primer fotón no se extingue, a este proceso se le conoce como emisión estimulada [2].

## 2.2 Amplificador EDFA

El amplificador óptico de fibra dopada con erbio (EDFA=Erbitum Doped Fiber Amplifier) ha generado especial interés para las comunicaciones ópticas debido a que el ion  $Er^{3+}$  posee una transición láser alrededor de  $1.536\mu m$ , lo cual permite amplificar las señales de los sistemas de comunicaciones por fibra óptica en la terce-

ra ventana (longitudes de onda entre  $1.53\mu m$  y  $1.55\mu m$ ) [6].

En la figura 3, se muestra la configuración básica de un amplificador óptico EDFA; en este dispositivo se puede observar como por medio de un acoplador la fibra dopada queda de forma transversal a la fuente de bombeo, de esta manera una señal que presenta atenuación es amplificada cuando pasa por la fibra dopada con iones de Erblio (Er). El acoplador utilizado en este dispositivo logra que la radiación de bombeo pase a la línea de transmisión y evita que la radiación de la señal que se amplifica pase a la rama del bombeo [6].



**Figura 3.** Configuración básica del amplificador óptico de fibra dopada [6].

El Er tiene una característica física que le permite reaccionar a los fotones emitidos por un haz de luz, dicha característica permite acelerar la producción de fotones lo cual representa en un sistema de transmisión óptico un aumento significativo en la potencia óptica [8].

El Er puede reaccionar a una longitud de onda de  $1480\mu m$  o  $980\mu m$ , por lo tanto, el funcionamiento de un EDFA depende de una potencia de bombeo que permita reaccionar a los iones de Er. En la figura 4, se muestra un esquema de bombeo en el que se ingresa la señal a amplificar, y la señal de bombeo ( $1480$  o  $980\mu m$ ) combinadas por un multiplexor al EDFA, lo anterior provoca que las partículas de Er reaccionen a los fotones de luz, con la producción de más fotones se incrementa la potencia de las dos señales introducidas. Al final del sistema se utiliza un filtrado óptico que permite separar la señal amplificada de la señal de bombeo, permitiendo el paso únicamente de la señal amplificada [8].



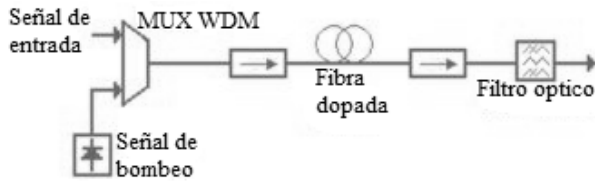


Figura 4. Esquema general del amplificador óptico de fibra dopada [8].

### 2.3 Amplificador RAMAN

Los amplificadores Raman se valen de la ganancia Raman de la propia fibra óptica. Dicha ganancia responde a un efecto no lineal producido en la molécula de SiO<sub>2</sub> (Dióxido de Silicio) que compone la fibra, y que dada la disposición de esta como guía de onda se estimula en la propia propagación. La Figura 5 muestra los espectros de ganancia Raman para diferentes tipos de fibra óptica. Como se puede ver en dicha figura, la ganancia Raman produce un espectro de ganancia de aproximadamente 20 THz a partir de la longitud de onda de bombeo, esta ganancia se produce en cualquier longitud de onda, con un máximo de 13 THz de la frecuencia de bombeo (aproximadamente la ganancia Raman tiene una anchura de 150nm por encima de la longitud de onda de bombeo en la ventana de 1550nm y el máximo de ganancia se produce en esta ventana a 100nm del bombeo). El problema de los amplificadores Raman es que requieren de grandes potencias de bombeo (>0.5 W) [9].

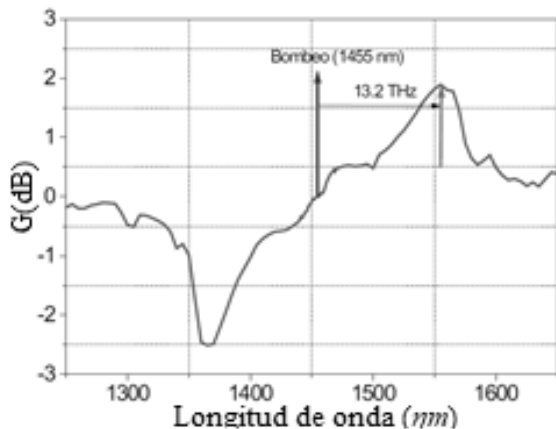


Figura 5. Espectro de ganancia Raman para diferentes tipos de fibra óptica [10].

### 3. ANALISIS Y COMPARACIÓN

En [1] se afirma que a pesar de que las no linealidades del SOA contribuyeron a que esta tecnología fuera reemplazada por los EDFA, fue precisamente esta característica la que permitió a los amplificadores ópticos de semiconductor centrarse en aplicaciones de procesado como la conmutación todo óptica, la conversión de longitud de onda en sistemas WDM, realizar compuertas lógicas ópticas, comportarse como un generador de pulsos y generar filtros dinámicamente configurables. No obstante, en la actualidad se cuenta con sistemas ópticos locales que hacen uso de los SOA como dispositivo de amplificación óptica.

Los amplificadores ópticos SOA poseen las ventajas del control por corriente y un manejo de ancho de banda considerable, además son compactos e integrables, pero su sensibilidad de polarización, diafonía, factor de ruido alto y potencia de saturación pequeña lo convierten en una alternativa de amplificación óptica no muy buena.

El uso del amplificador de guía de onda quedó relegado a un segundo plano al desarrollarse los EDFA (amplificadores de fibra dopada con iones de Er) ya que estos últimos presentan un comportamiento lineal y unas constantes de recombinación del orden de ms ( $\eta$ s para los SOAs). Esto permite que sean utilizados en enlaces WDM, ya que es posible la amplificación sin *crossstalk* entre los canales. Los EDFA son utilizados en mayor parte para comunicaciones a gran distancia, por lo cual son de gran vitalidad en cables submarinos gracias a su aplicabilidad y grandes prestaciones. Además, presentan otras ventajas, como las bajas pérdidas de acoplo a la fibra óptica, reflexiones despreciables, independencia a la polarización, alta ganancia, alta potencia de saturación de salida y baja figura de ruido (*NF*, *Noise Figure*). Como contrapartida son amplificadores caros (necesitan bombeo óptico) y no trabajan en segunda ventana [1].

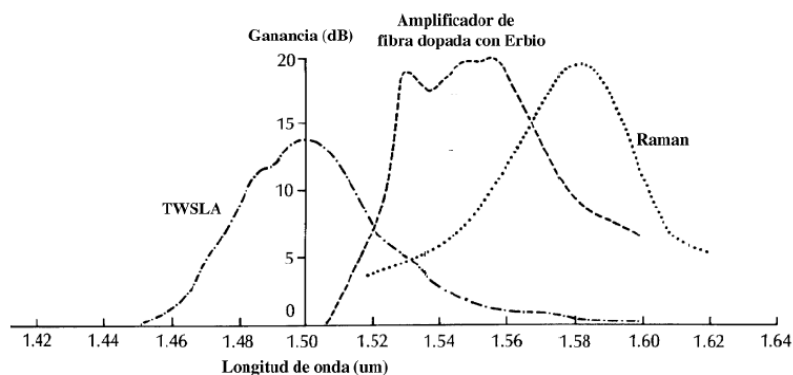
Los amplificadores Raman se utilizan en configuraciones de contra-propagación, la mayor parte de la amplificación se concentra al final del trayecto, por lo cual evitan superar el umbral de efectos no lineales, la amplificación Raman reduce la emisión de ruido de los EDFA lo cual es ideal para los sistemas de amplificación híbridos EDFA/RAMAN, como desventaja vemos que requiere de una considerable potencia de bombeo para lograr prestaciones aceptables. En la siguiente tabla [11], se

exponen las principales características de los amplificadores SOA y EDFA.

**Tabla 2.** Características principales de los amplificadores SOA y EDFA

Característica	SOA	EDFA
Ganancia (dB)	10 - 15	30 o mas
Potencia de saturación (dBm)	Máximo 1	Mínimo 17
Factor de ruido (dB)	5 - 6	4
Dimensiones (m)	Menores a 0.001	10 - 100
Banda de paso (nm)	30 - 60	20 - 30
Margen (nm)	1300 - 1550	1530 - 1565
Integración	Posible	Imposible
Anchura de banda de $\lambda$ (nm)	40	35

De la tabla anterior se resalta que el SOA presenta un mejor factor en cuanto a dimensiones, banda de paso, margen, integración, y ancho de banda. En los EDFA las características dominantes respecto a los SOA son la ganancia, potencia de saturación y factor de ruido. Haciendo un balance entre las ventajas de cada tecnología de amplificación, se evidencia que las características más significativas juegan a favor de los EDFA, haciendo más atractiva esta tecnología de amplificación. En la figura 6 se exponen las respuestas de los amplificadores de onda viajera OV-SOA, el amplificador de fibra dopada con Er y el amplificador de fibra de efecto Raman. Se resalta que las tres tecnologías de amplificación poseen anchos de banda similares, aunque en el SOA dicho factor es ligeramente mayor, además, es claro que los amplificadores ópticos EDFA y Raman poseen una ganancia superior, comparada con la del SOA.



**Figura 6.** Características de amplificadores ópticos para la banda de 1.5μm [4].

El amplificador de efecto no lineal (Raman) es el competidor del EDFA en la banda de los 1500nm, pero al realizar la comparación entre los dos sistemas ópticos, el amplificador predilecto es el de fibra dopada, pues

además de las ventajas mencionadas en los párrafos anteriores, se destaca su versatilidad y costo reducido. En la siguiente tabla se expone la comparación entre las tecnologías de amplificación óptica EDFA y Raman [12].

**Tabla 3.** Características principales de los amplificadores EDFA y Raman

Característica	EDFA	Raman
Amplificación de banda	Las bandas "C" y "L" (alrededor de 1500 nm); no trabajan en el rango de 1300nm.	Depende de la disponibilidad de bombas de longitud de onda; funciona en todas las bandas.
Ganancia	30 dB o más dependiendo de la concentración de los iones, la longitud de la fibra y la configuración de las bombas.	De 4 a 11 dB, proporcional a la intensidad de la bomba y la efectividad de la longitud de la fibra

<i>Característica</i>	<i>EDFA</i>	<i>Raman</i>
<i>Potencia de saturación</i>	Depende de la ganancia y las constantes del material.	Se aproxima a la potencia de las ondas de la bomba.
<i>Ruido</i>	Amplifica el Ruido.	No amplifica el ruido.
<i>Longitud de onda de la bomba</i>	980nm o 1480nm.	Aproximadamente 100nm debajo de la longitud de onda de la señal en ganancia pico.
<i>Espaciamiento</i>	80 a 100 km.	Alrededor de 65 km.

Los sistemas de comunicaciones ópticos modernos buscan integrar las tecnologías ópticas de amplificación EDFA y Raman. Los amplificadores híbridos EDFA/Raman se han convertido en una ciencia emergente muy favorable, pues permiten la maximización del segmento de amplificación, como se expone en la figura 7, obteniendo como resultado una minimización de los efectos de no linealidades en la fibra, además mejorar el ancho de banda de los amplificadores de fibra dopada con Er [13].

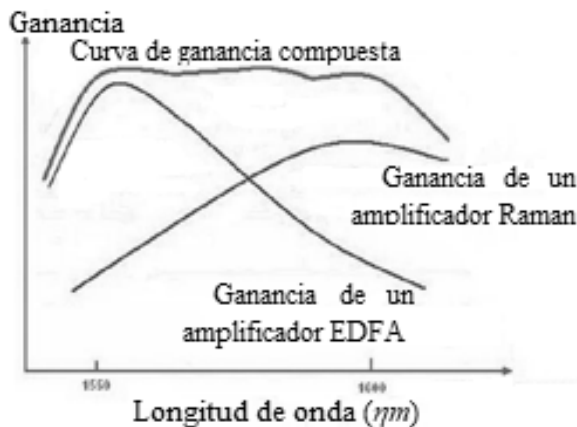


Figura 7. Ganancia compuesta de un EDFA y un Raman [10].

### CONCLUSIONES

Las tres principales clases de amplificadores ópticos que existen actualmente son los EDFA, Raman y SOA, En este artículo se logra determinar que el amplificador dominante en los sistemas de comunicación ópticos es el EDFA, pues presenta unas ventajas significativas como el ancho de banda, potencia de salida y características de ruido mínimas, además proporciona ventajas funcionales y de coste significativas que se ven reflejadas en mejores prestaciones en función de la potencia de transmisión óptica. Ideal en aplicaciones para comunicaciones a gran distancia como redes de área amplia y comunicaciones inter continentales.

### REFERENCIAS

- [1] M. D. Manzanedo Martínez (Universidad politécnica de V), “Aplicación de los amplificadores ópticos de semiconductor a la fotónica de microondas”, 2013.
- [2] V. M. Perilla (Universidad distrital F. J. de C), “Análisis del amplificador óptico de semiconductor y su aplicación a sistemas de regeneración de onda 2R”, 2015.
- [3] M. Castro (Universidad N. A. de M), “Ampliación del ancho de banda en una red de fibra óptica empleando un sistema de multiplexación por divisiones en longitudes de onda densas (dwdm)”, 2014.
- [4] “Amplificación óptica y óptica integrada”, pp. 82–90.
- [5] J.S. Castellanos-Casas, C.S. Rojas-Piña, & G.A. Puerto-Leguizamón, “Diseño de una red óptica pasiva bidireccional con particionamiento espectral de una fuente de banda ancha”, Rev. Ingeniería, Investigación y Desarrollo, Vol. 18 [1], pp. 25-33, 2018. DOI: <https://doi.org/10.19053/1900771X.v18.n1.2018.7852>
- [6] P. Torres, “Análisis por Elementos Finitos del Amplificador de Fibra Optica Dopada con Erblio”, 1995.
- [7] C. Jaen (Universidad P. de M), “Estudio de limitaciones en sistemas WDM”, 2002.
- [8] J. H. Hinojosa Erazo (Escuela P. N. de E), “Diseño de una propuesta de red de acceso para brindar servicios de internet, telefonía, datos y televisión a través de FTTH, para el sector de Iñaquito mediante la tecnología RFOG para un proveedor de CATV”, 2014.
- [9] M.Gutiérrez Hernández (Universidad P. de M), “Diseño, construcción y puesta a punto de un circuito de alimentación de láseres de diodo de alta potencia y amplificadores ópticos de semiconductor”, 2005.

- [10] S. Martín López, (Universidad C. de M) Generacion de supercontinuo en fibras opticas monomodo con fuentes de bombeo continuo. 2007.
- [11] S. Y. R. Digitales, "Definición y métodos de prueba de los parámetros genéricos pertinentes de los dispositivos y subsistemas de amplificadores ópticos", 2006.
- [12] M. Magaña Loyo (Instituto P. N. de M), "Amplificador universal Raman para equipo OTDR en enlaces ópticos de larga distancia", 2015.
- [13] A. O. Hernández Calvario, "Diseño, caracterización e implementación de un amplificador versátil de fibra dopada con erbio", 2010.

## COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE MATERIAL COMPUESTO REFORZADO CON FIBRAS DE CHONTADURO (BACTRIS GAPISAPES)

### Mechanical behavior of chontaduro (bactris gapisapes) fiber reinforced material composite

Juan Pablo Villate Díaz<sup>1</sup>, Nelson Joman Vargas Ortiz<sup>1</sup>

<sup>1</sup>MSc. Fundación Universitaria Agraria de Colombia (Bogotá, Colombia).villate.juan@uniagraria.edu.co  
vargas.nelson@uniagraria.edu.co

(Recibido febrero 9 de 2018 y aceptado junio 15 de 2018)

#### Resumen

Este trabajo presenta los resultados de un programa experimental del comportamiento mecánico de un material compuesto a base de cemento reforzado con fibras de chontaduro. Esta palma (Bactris Gapisapes) es una de las especies de gran abundancia en América Latina y su crecimiento acelerado hace que sea un material accesible para posterior uso. Se realizaron ensayos a tracción directa tanto de la fibra como del compuesto. Para el compuesto se usó una fracción volumétrica de fibra del 4% extraída del tronco de la palma. La resistencia a tracción de la fibra resultó en valores de 190 MPa y módulo de elasticidad de 7,3 GPa. El compuesto reforzado con la fibra de chontaduro resultó con la formación una única fisura con una resistencia a tracción de 3 MPa, estos resultados servirán para generar un mejoramiento en el comportamiento mecánico y poder generar un material adecuado para ser usado en construcciones rurales en elementos de muros de carga.

**Palabras clave:** fibras de chontaduro A; Compuesto a base de cemento B; Comportamiento mecánico C.

#### Abstract

This work presents the results of an experimental program on the mechanical behavior of chontaduro palm fibers and cement based material composites reinforced with these fibers. This palm (Bactris Gapisapes) is one of the species of great abundance in Latin America and its accelerated growth makes it an accessible material for later use. Additionally, the fibers were used as reinforcement in cement based composites using volumetric fractions of 4% extracted from the trunk of the palm. The tensile strength of the studied fibers varied of 190 MPa and the modulus of elasticity of 7,3 GPa. The composites presented a strain softening behavior with the formation of only one crack. The tensile strength of the composite of 3 MPa. these results will serve to generate an improvement in the mechanical behavior and to be able to generate a suitable material to be used in rural constructions in load-bearing walls elements

**Keywords:** chontaduro fibers A; Cementitious composite B; Mechanical behavior C.

### 1. INTRODUCCIÓN

Las técnicas usadas tradicionalmente para la construcción son evaluadas por normas y métodos de diseño en la ingeniería, las cuales se van actualizando diariamente para optimizar las propiedades físico-mecánicas de los materiales. Sin embargo, el uso de materiales naturales está limitado por no contar con estudios necesarios y técnicas de conservación de los mismos y aún más por no contar con normatividad para su utilización en construcciones civiles, puesto que normas como

el reglamento colombiano de construcción sismo resistente (NSR-2010), solo tienen parametrizados el uso de materiales no convencionales como la guadua y la madera, esto se ve reflejado en que las comunidades rurales no hacen uso de los materiales autóctonos para la construcción, mejoramiento y adecuación de sus viviendas. Por eso hace tan importante el estudio de sus propiedades mecánicas con el fin de que su uso no sea empírico, sino al contrario se tengan unos parámetros claros del comportamiento real y metodológico como ejemplo el material estudiado en este trabajo. Los

materiales de construcción convencionales como el acero y concreto, son los componentes más relevantes en la infraestructura y presentan una alta demanda hoy en día, aunque por los elevados costos de estos materiales y gran el impacto negativo en el medio ambiente, se han aumentado el uso de materiales sustentables como son los compuestos reforzados con fibras naturales [1]. Estos compuestos naturales pueden reducir el desecho de la industria de la fabricación del material, adicional a esto aumenta la eficiencia energética al ofrecer una solución a la infraestructura en poblaciones menos favorecidas, así como promover el concepto de sustentabilidad.

Estudios sobre compuestos reforzados con fibras largas y bidireccionales, muestran que tienen una a mayor resistencia a la tracción y una capacidad de absorción de energía alta con la formación de múltiples fisuras. [8] [9]. Para esto el contenido de fibra debe ser mayor que la fracción crítica. [10]. Los estudios en la interfaz de la fibra natural con una matriz de cemento muestran que las secciones transversales irregulares presentan altos niveles de adherencia, con valores promedio hasta de 0.92 MPa (para sisal fibras). [11]. En el caso de que se produzca una alteración en la interfaz, por ejemplo, con un recubrimiento polimérico estos valores de adherencia pueden mejorar y aumentar hasta 1.25MPa [8].

La búsqueda de nuevos materiales sustentables, han motivado este trabajo. Los autores han buscado una alternativa con la una fibra natural como la de chontaduro, además que esta planta tiene un crecimiento rápido. El objetivo primordial del presente trabajo fue evaluar el comportamiento mecánico a tracción directa tanto de la fibra como del compuesto a base de cemento reforzado con fibras de chontaduro. [4] [12] [3].

## 2. METODOLOGÍA

Se obtuvo una palma con una edad de 2 años en Buenaventura - Colombia (ver figura 1) y que presentaran una coloración uniforme y que además permitieran observar si estas se encontraban sanas, es decir que permitieran observar que estas no presentaran fisuras, golpes o perforaciones bien sea por la intemperie o por plagas de insectos.



Figura 1. Palma de chontaduro

De las muestras de chontaduro se extrajeron las fibras con diámetros de 0.5 mm y 1 metro de longitud, esta extracción se puede realizar de dos maneras, la primera por medio de un trapiche, el cual es un molino mecánico que aplasta la el tallo dejando expuesta su parte interna, y la segunda es de forma manual, la cual se realiza por medio de un martillo que fractura la capa externa de la palma y manualmente se extraen las fibras de las capas internas (ver figura 2). Para este estudio se eligió realizar este procedimiento de forma manual ya que era menos agresivo con la muestra puesto que al soportar la carga del molino, podría verse afectada la resistencia posterior de las fibras.

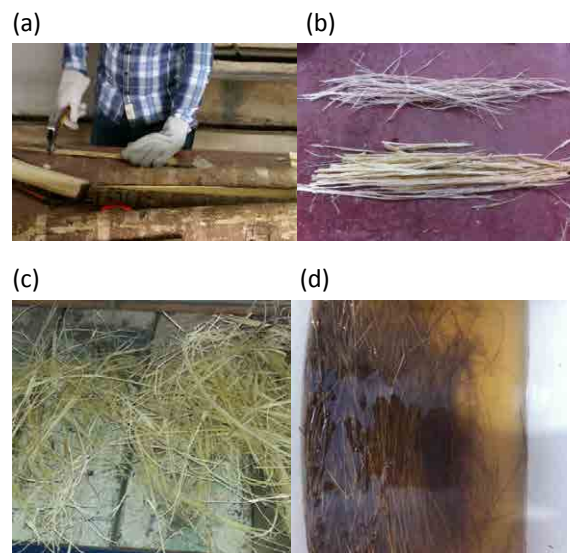


Figura 2. Extracción manual de fibras de chontaduro. (a) extracción manual con martillo. (b) fibras extraídas. (c) tratamiento con agua a temperatura de 30 °C y (d) secado a intemperie.

Luego de extraer las fibras, se someten a un lavado con agua a una temperatura de 30°C, para después dejar que estas se secan a una temperatura de 28°C (ver figura 2), ya que la humedad interna que traen al estar en contacto con el ambiente exterior genera que en las fibras se presenten hongos, los cuales afectan de manera notable la resistencia y por tanto los resultados de esta investigación. Al tener una buena cantidad de fibras, se realizó una segunda selección más específica y rigurosa, en la cual se escogieron fibras que tuvieran un diámetro calidad similar de 0.5 mm para tener unos resultados más confiables.

Las fibras de chontaduro se organizaron unidireccionalmente, en el sentido axial a la carga para que los esfuerzos a tracción estuvieran distribuidos al largo de la fibra (ver figura 3). Los ensayos a tracción directa de materiales compuestos a base de cemento usando fibras no tiene una normalización clara, puesto existen muchos factores que pueden variar su resultado, como la fragilidad del concreto, la iteración entre las el sistema de agarre entre el cuerpo de prueba y la maquina universal, en ese caso se siguió la normativa ASTM C 150-07 y ASTM C 1557, las cuales siguen parámetros de especificaciones estándares para cemento portland y métodos de ensayo directo para determinar módulo de elasticidad de fibras.



**Figura 3.** Fibras organizadas para colocar embebidas unidireccionalmente al compuesto

Los ensayos de tracción directa del material compuesto, donde su matriz fue realizada con un mortero con una dosificación en peso de 1:1:0,4 (cemento: arena de peña: agua/cemento), se realizó en el modelo MTS 311 con una celda de 1000 kN. La velocidad de desplazamiento fue 0,5 mm / min (ver figura 4). Las dimensiones de cada cuerpo de prueba fueron 400 x 50 x 15 mm (longitud x ancho x espesor), se reforzaron con fibras de chontaduro unidireccionalmente con 4 capas de fibras sin tratamiento, que es equivalente a un volumen de 4% respectivamente, esta cuántica se determinó según el número de fibras obtenido.



**Figura 4.** Ensayo de tracción directa del material compuesto

El ensayo de adherencia se realizó con tubos de PVC de diámetro de 2 cm y longitudes de fibras embebidas de 5 cm, donde la maquina universal MTS, realizaba un proceso de arrancamiento de la fibra.

### 3. RESULTADOS

La fibra de chontaduro obtuvo un módulo de elasticidad de 8 GPa y una resistencia a tracción de 190 MPa (ver tabla 1), donde comprado con otras fibras vegetales, muestra que la resistencia a tracción directa de esta fibra es baja, siendo más resistentes fibras de coco (192 MPa), fibra de sisal (546 MPa) y fibras de bambú (812 MPa) [2] [3] [4] [5]. Este comportamiento influye en los resultados del material compuesto, por lo tanto, su comportamiento junto a su superficie lisa (sin estrías o corrugaciones que mejoren el comportamiento de adherencia fibra- matriz) y la baja fracción volumétrica de la fibra (4%), puede ser determinante para su comportamiento son la formación de una sola fisura.

**Tabla 1.** Resultados de ensayo a tracción directa de fibras de chontaduro.

Resistencia máxima a tracción (MPa)		Deformación máxima (%)		Módulo de elasticidad (GPa)	
190	±17.8	2.8	±0.3	7,3	±0.8

La resistencia máxima de adherencia a la tracción de la matriz de cemento y las fibras de chontaduro, calculada a partir de la ecuación (1) es de 0,15MPa (ver tabla 2). Otras fibras naturales tales como la fibra de sisal presentan valores de 0.92 MPa [11] y fibras de juta presentan valores de 1.25MPa [8]. Los resultados indican que la adherencia de la fibra con la matriz es débil, comparados con otras fibras. La resistencia de adherencia ( $\tau_{nom}$ ). [14] [11].

$$t_{nom} = \frac{P_{max}}{pf L} \quad (1)$$

Donde Pmax es la fuerza máxima de adherencia, L es la dimensión de inserción y es el de la medición del diámetro.

**Tabla 2.** Resultados ensayo de adherencia fibra-matriz.

Longitud de recubrimiento (mm)	Pmax (N)	$\delta$ (correspondiente a Pmax) (mm)	$\tau_{nom}$ (MPa)
80	27 ±6.9	2.3 ±1.7	0.15 ±0.04

Una de las consecuencias de no obtener un comportamiento dúctil conformación de múltiples fisuras, es la baja adherencia de la fibra de chontaduro con la matriz de cemento, que también se mencionó en otros estudios [15]. Se puede ver que el comportamiento mecánico del compuesto, cuando se utiliza fibras de chontaduro, la resistencia a tracción aumenta hasta una resistencia máxima de 3,05 MPa (ver tabla 3 y 4), aunque se presente una formación de una sola fisura (ver figura.5), después existe un endurecimiento causada por la resistencia establecida por las fibras, hasta la falla de estas. Este comportamiento frágil, puede ser debido también a la baja fracción volumétrica de fibra en la matriz.



**Figura 5.** Formación de única fisura dentro del rango del compuesto

**Tabla 3.** Resultados ensayo a tracción directa de compuesto a base de cemento reforzado con fibras de chontaduro (resistencia máxima a tracción).

Compuesto	Fracción volumétrica de fibra (%)	Resistencia máxima a tracción (MPa)	
Matriz	-	1.5	± 0.12
4 capas de fibras	4	3.05	± 0.52



**Tabla 4.** Resultados ensayo a tracción directa de compuesto a base de cemento reforzado con fibras de chontaduro (deformación máxima).

Compuesto	Fración volumétrica de fibra (%)	Deformación máxima (%)
Matriz	-	0.01 ± 0.001
4 capas de fibras	4	0.3 ± 0.06

### CONCLUSIONES

La matriz mejoró su comportamiento mecánico con la adición de fibras de la palma de chontaduro, pero se debe mejorar la interface fibra – matriz para mejorar este comportamiento de formación de múltiples fisuras a tracción directa.

La fibra presenta una superficie muy lisa, lo cual se necesita un tratamiento en la misma para mejorar la adherencia fibra – matriz.

La matriz presentó un buen comportamiento a compresión, no obstante, a tracción presentó un comportamiento deficiente por esto se analizó el compuesto solo a tracción.

El comportamiento mecánico del material compuesto no es el adecuado para seguir con la etapa de generación de un nuevo material, esto es debido a su bajo porcentaje de fibra usada en el compuesto; la adherencia pobre entre fibra y matriz, por tal motivo es importante mejorar los aspectos anteriormente mencionado para adecuar mejor el material a las sollicitaciones evaluadas.

### RECOMENDACIONES PARA FUTUROS TRABAJOS

Ensayos de pull-out para determinar interface fibra matriz relacionando ensayos de microscopia electrónica por barradura para determinar morfología de fibra e incidencia de vacíos en el comportamiento mecánico de la fibra, mejoramiento de superficie de fibra para determinar mejoramiento en comportamiento mecánico de compuesto, ensayos de durabilidad para determinar degradación de fibra.

Ensayos con otras fibras (caña brava, sisal y coco.) para determinar cuál es la fibra más apropiada para el compuesto.

Ensayo de muro de carga escala real para determinar su comportamiento mecánico real.

Modelar y realizar memoria de cálculo de diseño de casa de un piso unifamiliar como sistema constructivo de muros de cargas.

Construcción de casa unifamiliar de un piso según todo el estudio realizado anteriormente.

### REFERENCIAS

- [1] J. George, M. S. Sreekala, S. Thomas, "A Review on Interface Modification and Characterization", *Revista 41 Polymer engineering and science*, vol. 41. n.º 9, pp 1471-1485, noviembre 2015.
- [2] D. B. Dittenber, H. V. S. GangaRao, "Critical review of recent publications on use of natural composites in infrastructure", *Revista Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol.43 n.º 9, pp 1419-1429, agosto 2012.
- [3] R. D. Tolêdo Filho, K. Ghavami, G. L. England, K. Scrivener, "Development of vegetable fibre-mortar composites of improved durability", *Revista Cement and Concrete Composites*, vol. 25 n.º 2, pp. 25, 185, febrero 2003.
- [4] F. d. A. Silva, R. D. T. Filho, J. d. A. M. Filho, E. d. M. R. Fairbairn, "Physical and mechanical properties of durable sisal fiber-cement composites", *Revista Construction and Building Materials*, vol. 24 n.º 5 pp. 777-785, mayo 2010.
- [5] A. Alida, M. N. Mazlee, B. J. Shamsul, H. Kamarudin, "Composite cement reinforced coconut fiber: Physical and mechanical properties and fracture behavior", *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, vol. 5. Pp 1228-1240, noviembre 2011.
- [6] D. G. Swift, R. B. L. Smith, "The flexural strength of cement-based composites using low modulus (sisal) fibres", *Revista Composites*, vol.10 n.º 3, pp. 145-148, julio 1979.
- [7] P. R. Lima Lopes, R. D. Toledo Filho, "Uso de meta-caulinita para incremento da durabilidade de compositos à base de cimento reforçados com fibras de sisal" *Revista Ambiente Construido*. Vol.8 n.º 4. Pp. 7-19, enero 2008.

- [8] M. E. Alves Fidelis, F. de Andrade silva, R. Dias Toledo Filho, "The Influence of Fiber Treatment on the Mechanical Behavior of Jute Textile Reinforced Concrete", *Revista Key Engineering Materials*, vol. 600. pp 469-474, febrero 2014. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.600.469>
- [9] F. d. A. Silva, D. Zhu, B. Mobasher, C. Soranakom, R. D. Toledo Filho, "High speed tensile behavior of sisal fiber cement composites", *Revista Materials Science and Engineering*: vol. 527 n.º 3. pp 544-552, enero 2010.
- [10] A. Bentur, S. Mindess, "Fibre reinforced cementitious composites", *CRC Press Ed*, 2nd edición. Pág. 624. London, abril 2014.
- [11] F. d. A. Silva, B. Mobasher, C. Soranakom, R. D. T. Filho, "Effect of fiber shape and morphology on interfacial bond and cracking behaviors of sisal fiber cement based composites". *Revista Cement and Concrete Composites*. vol.33 n.º 2. pp 814-823. Septiembre 2011.
- [12] R. D. Toledo Filho, F. d. A. Silva, E. M. R. Fairbairn, J. d. A. M. Filho, "Durability of compression molded sisal fiber reinforced mortar laminates" *Revista Construction and Building Materials*. vol. 23 n.º 6. pp 2409-2420. junio 2009.
- [13] B. J. Mohr, J. J. Biernacki, K. E. Kurtis, "Supplementary cementitious materials for mitigating degradation of kraft pulp fiber-cement composites". *Revista Cement and Concrete Research*, vol. 37 nº11. pp 1531-1543. noviembre 2007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.08.001>
- [14] M. Z. Rong, M. Q. Zhang, Y. Liu, G. C. Yang, H. M. Zeng, "The effect of fiber treatment on the mechanical properties of unidirectional sisal-reinforced epoxy composites". *Revista Composites Science and Technology*. vol 61 nº10. Pp 1437-1447. agosto 2001. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(01\)00046-X](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(01)00046-X)
- [15] M. A. de Farias, M. Z. Farina, A. P. T. Pezzin, D. A. K. Silva, "Unsaturated polyester composites reinforced with fiber and powder of peach palm: Mechanical characterization and water absorption profile", *Revista Materials Science and Engineering: C*, vol 29 nº2. pp 510-513. marzo 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msec.2008.09.020>

Cómo citar este artículo:

J. Tabares-Catimay, L.M. Gallo-Martínez, and N.A. Mancipe-Muñoz, "Modelación matemática de techos verdes en Colombia: selección de un modelo mediante la metodología AHP", *Rev. Ing. Investig. Desarro.*, vol. 18 (2), pp. 35-46, Julio. 2018.

## MODELACIÓN MATEMÁTICA DE TECHOS VERDES EN COLOMBIA: SELECCIÓN DE UN MODELO MEDIANTE LA METODOLOGÍA AHP

### Selection of a mathematical model through the AHP methodology to model green roofs in Colombia

Jeniffer Tabares Catimay<sup>1</sup>, Laura Marely Gallo Martínez<sup>2</sup>, Néstor Alonso Mancipe<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Universidad de La Salle, estudiante del programa de Ingeniería Ambiental y Sanitaria, Colombia. Email: jtabares29@unisalle.edu.co

<sup>2</sup> Universidad de La Salle, estudiante del programa de Ingeniería Ambiental y Sanitaria, Colombia. Email: jtabares29@unisalle.edu.co

<sup>3</sup> Universidad Nacional de Colombia. Ingeniero Ambiental y Sanitario. Doctor en Ingeniería Ambiental. Profesor asistente, Colombia. Email: nmancipe@unal.edu.co

(Recibido 21 de Febrero 2019 y aceptado 04 de Julio 2019)

#### Resumen

Los techos verdes (TV) son estructuras que almacenan aguas lluvia, convirtiéndose en una alternativa para el manejo de la escorrentía urbana. Esta investigación se realiza con el fin de seleccionar un modelo matemático para que posteriormente simule la dinámica de TV experimentales construidos en Bogotá, mejorando el proceso de toma de decisiones frente a su implementación en zonas urbanas intertropicales de Colombia al considerar variables meteorológicas, del sustrato y de diseño. Para realizar la selección se empleó la metodología procesos analíticos jerárquicos (AHP por sus siglas en inglés), técnica que emplea operaciones matriciales para tomar decisiones basadas en juicios de valor establecidas por expertos disminuyendo el sesgo generado por la subjetividad de la evaluación. Inicialmente se realiza una consulta bibliográfica determinando modelos matemáticos empleados en la modelación de TV, estos son: SWAM, SWMM 5.1, HYDRUS 1-D, SWAP, SWMS 2-D, MIKE URBAN, WinSLAMM Y SUSTAIN. Posteriormente se califica el desempeño individual de los modelos respecto a tres criterios de selección (datos de entrada, atributos y datos de salida). Esta calificación es evaluada por expertos en hidrología urbana o en Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS). Los juicios de valor emitidos por los expertos se utilizan para elaborar matrices pareadas con la metodología AHP, indicando el modelo que mejor cumple los criterios de selección. Se obtuvo que el modelo EPA-SWMM 5.1 cumple satisfactoriamente los requerimientos para modelar techos verdes en Colombia dado que es un software libre, cuenta con un módulo de SUDS, permite modelar eventos de lluvia continuos, entre otras variables. Se desarrolla una lista en orden jerárquico que otros autores podrían usar para seleccionar el modelo que mejor se ajuste a sus necesidades de modelación en TV para condiciones colombianas.

**Palabras clave:** Escorrentía, metodología AHP, modelación matemática, techos verdes.

#### Abstract

Green roofs (GR) are engineering structures that stores rainwater as an alternative for urban stormwater management. This research is carried out to select a mathematical model to simulate the experimental TV dynamics from Bogotá, improving the decision-making process regarding GR real implementation in intertropical urban areas of Colombia that considers meteorological, substrate and design variables. A hierarchical analytical method (AHP) is used to select the model for simulating GR. The AHP is a matrix technique that allows a decision-making process based on expert criteria in order to decrease the bias of subjectivity during the assessment. First, a bibliographic review is made to identify GR models to be evaluated: SWAM, SWMM 5.1, HYDRUS 1-D, SWAP, SWMS 2-D, MIKE URBAN, WinSLAMM and SUSTAIN. Then, each model performance is qualified with respect to the selection criteria (Input data, attributes, and output). The value judgments issued by the experts are used to develop paired matrices with the AHP methodology to obtain the model that best meets the selection criteria. The model EPA-SWMM 5.1 is found to comply with the proposed requirements for modeling GR in Colombia. SWMM is a free software that has a SUDS module and allows continuous events simulation, among other variables. A hierarchical list is developed for other modeling user's decision according to their GR modeling needs.

**Key words:** Runoff, AHP methodology, mathematical modeling, green roofs.

## 1. INTRODUCCIÓN

Colombia se encuentra ubicada en la zona de confluencia intertropical, produciéndose dos épocas de invierno. En estas épocas las altas precipitaciones incrementan el caudal de escorrentía en especial en zonas urbanas, ya que la impermeabilización de los suelos disminuye los procesos de infiltración, almacenamiento subterráneo y evapotranspiración que ocurren naturalmente en las zonas no urbanizadas [1]. Los picos de escorrentía pueden saturar la red de alcantarillado generando problemas como inundaciones, desbordamientos de ríos y quebradas, pérdidas económicas y humanas, entre otros [2]. Como propuesta para el manejo de la escorrentía urbana y la reducción del riesgo de inundación [3] se han desarrollado sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS) desde finales de la década de los 70 [4], [5]USA, was estimated from mid-October 2000 through October 2001 based on eddy covariance measurements and statistical modeling from microclimatic data. Measurements were made in 68% of the hours during the year of study, with > 50% coverage in all months except December and August. Data were filtered by wind direction and atmospheric turbulence to remove invalid measurements. Analysis of filtered data showed that photosynthetically active radiation (PAR. Entre estos SUDS se encuentran los techos verdes (TV) los cuales cumplen con la función de filtrar, retener y almacenar agua lluvia [6]the hydrologic attenuation of an ecoproductive green roof is assessed using three indicators: lag-time, runoff coefficient and water volume retention. Two types of plants-an herbaceous (*Lactuca sativa*. Una de las ventajas de los TV, respecto a otros tipos de SUDS es que pueden ubicarse en áreas previamente urbanizadas, como techos y terrazas [3], [7]design, construction and maintenance of Sustainable Drainage Systems (SuDS).

En Colombia la investigación sobre TV se ha centrado en el estudio de montajes experimentales y atenuación de picos de escorrentía. No obstante, el registro continuo de datos en estas investigaciones permite calibrar y validar modelos predictivos que describan el comportamiento hidrológico e hidráulico de los TV en distintos eventos de lluvia. De esta manera, la modelación se convierte en una herramienta de diseño y evaluación para los montajes experimentales.

El objetivo de esta investigación fue seleccionar un modelo matemático que permita realizar un análisis hidro-

lógico de un TV en diferentes escenarios dentro de un país intertropical como Colombia. A partir de los resultados de esta investigación se espera realizar la modelación de un módulo de techo verde experimental, cuyos resultados serán abordados en una nueva publicación. La aplicación del proceso analítico jerárquico en la selección del modelo se hizo necesaria para reducir la subjetividad inherente al proceso de selección, esto debido a que existen varias plataformas que permiten modelar el comportamiento hidrológico de distintos tipos de SUDS y cuentan con distintas características que resultan favorables dependiendo del enfoque de la investigación.

En este caso, el modelo debe considerar las variables meteorológicas, variables del sustrato y de diseño, para que los resultados sean útiles en análisis regionales en zonas urbanas de Colombia.

Con base en una revisión bibliográfica se eligieron ocho paquetes de programa (Software) desarrollados por entidades públicas o privadas. La selección se realizó por medio de la metodología procesos analíticos jerárquicos (AHP por sus siglas en inglés) [8]desarrollado por Thomas L. Saaty (The Analytic Hierarchy Process, 1980. Esta metodología está diseñada para cuantificar juicios u opiniones gerenciales sobre la importancia relativa de cada uno de los criterios en conflicto empleados en el proceso de toma de decisión.

La metodología AHP ha sido implementada en otras investigaciones para la toma de decisiones relacionadas con la ubicación de techos verdes. Sangkakool et al. [9] emplearon esta metodología para identificar y cuantificar los factores que influyen en la adopción de techos verdes en áreas urbanas de Tailandia, puesto que los techos son una alternativa para controlar los efectos de isla de calor al mejorar la eficiencia térmica de los edificios. Estos factores fueron evaluados cuantitativamente en un proceso de jerarquía analítica basado en juicios de expertos.

Así mismo Barrero y Ortigoza [10] evaluaron once modelos mediante esta metodología, para encontrar la mejor alternativa y estimar la contaminación por cargas difusas en un área con poca información, esto debido a que en Colombia la información es escasa y de difícil acceso.

## 2. METODOLOGÍA

Debido a que este trabajo investigativo se basa en el análisis comparativo de distintos modelos matemáticos, la selección se divide en tres fases: consulta bibliográfica de antecedentes, valoración del desempeño de cada modelo para los criterios a evaluar y selección del modelo mediante la aplicación de la metodología AHP.

### 2.1 Consulta bibliográfica

Para la consulta de antecedentes se buscaron artículos científicos sobre modelamiento de techos verdes en bases de datos virtuales como SciELO, Google académico y revistas indexadas. Además, se consultaron bases de datos sobre tesis y trabajos investigativos realizados en la Universidad de Los Andes, La Universidad Nacional y en La Universidad de La Salle. A partir de la información recopilada se seleccionaron algunos modelos que tuvieran características similares y que han sido empleados para la modelación matemática de techos verdes o que por sus características muestran potencial para realizar investigaciones sobre este tema. Posteriormente se realizó una investigación más a fondo sobre las características de estos modelos tales como: parámetros de entrada, tipo de análisis que realizan, escalas de tiempo que manejan, entre otros aspectos relevantes para la evaluación.

### 2.2 Valoración del desempeño de cada modelo por parte de expertos

Para realizar la valoración se acudieron a diferentes expertos investigadores que cuentan con experiencia en techos verdes experimentales y/o en modelación matemática con énfasis en hidrología. Para realizar la valoración se diseñó y envió en formato digital una encuesta que consta de varias preguntas las cuales permiten evaluar el desempeño individual de cada modelo en una escala de valoración. La encuesta se divide en tres secciones: la primera sección corresponde a la información del investigador, en donde debe indicar su nombre, formación profesional y código ORCID; en la segunda sección se le pide al investigador que califique de 1 a 5 la importancia de los criterios de evaluación indicados (sección 2.3.2) siendo 1 “sin importancia” y 5 “importancia máxima”; y en la tercera sección el investigador debe calificar de 1 a 5 el desempeño de cada una de las plataformas para cada subcriterio (sección 2.3.2) de acuerdo con su experiencia y/u otras fuentes de preferencia, siendo 1 el “peor desempeño” y 5 el “desempeño óptimo”. Al final, se deja un espacio para que el investigador coloque du-

das, sugerencias de otras plataformas y/o comentarios que considere pertinentes.

Adicional a la encuesta se enviaron instrucciones sobre cómo completarla y un archivo que permite contextualizar al investigador sobre las características de cada modelo. El archivo de contextualización incluye una descripción breve de las plataformas a evaluar, las variables que considera, los modelos (ecuaciones) principales que gobiernan la solución numérica de un elemento que pueda representar un techo verde y algunas características relevantes.

### 2.3 Metodología AHP

#### 2.3.1. Descripción de la metodología AHP

La metodología AHP (Analytic Hierarchy Process o Proceso Analítico Jerárquico) es una técnica que ayuda a la toma de decisiones multicriterio, para así obtener la mejor alternativa que mejor satisface los criterios que se pretendan evaluar. En esta metodología se realizan comparaciones entre pares de elementos, se cuantifican mediante matrices y se emplean elementos del álgebra matricial para establecer prioridades entre elementos de un nivel con respecto a los de otro [11].

En la figura 1 se puede observar un esquema de esta jerarquización, donde  $P_1$ ,  $P_2$  y  $P_3$  indican el peso que tiene cada criterio sobre la selección. De modo que es posible que un criterio sea más relevante para la selección o que dos criterios tengan el mismo peso. Las alternativas se evalúan respecto a cada criterio y su desempeño será la suma de los puntajes obtenidos en cada evaluación, la máxima calificación alcanzable para una alternativa sería de 1.0.

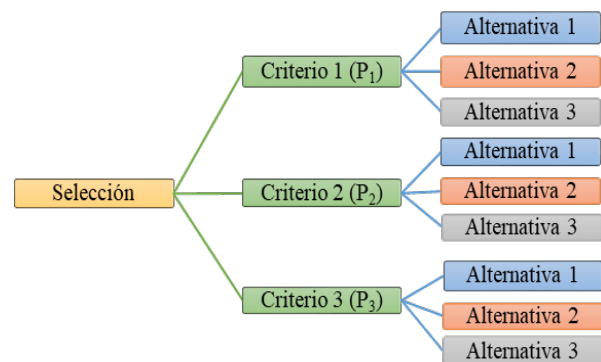


Figura 1. Esquema de jerarquización de la metodología AHP.

El proceso de jerarquización se inicia construyendo una matriz pareada para los criterios, en esta se analiza la importancia relativa de cada criterio respecto a los demás. Luego se construye una matriz pareada por cada criterio a evaluar en la cual se comparan las alternativas. En estas matrices se cuantifica la comparación entre un

criterio o alternativa respecto a otra usando una escala de 1-5 (tabla 1), donde 1 es de igual importancia y 5 importancia extrema de un elemento frente al otro. Los valores pares se utilizan para definir situaciones intermedias [12].

**Tabla 1.** Escala de preferencias [12]

Escala Numérica	Escala Verbal	Explicación
1	Igual importancia	Los dos elementos contribuyen de igual manera a la propiedad o criterio
2	Moderadamente más importante	El juicio y la experiencia favorecen más a un elemento que al otro
3	Fuertemente más importante un elemento que el otro	El juicio y la experiencia previa favorecen fuertemente a un elemento frente al otro
4	Mucho más fuerte la importancia de un elemento que la del otro	Un elemento domina fuertemente. Su dominación está probada en práctica
5	Importancia extrema de un elemento frente al otro	Un elemento domina al otro con el mayor orden de magnitud posible

En las matrices pareadas la calificación se realiza horizontalmente teniendo en cuenta que un criterio o alternativa respecto a si mismo tiene igual importancia y, por lo tanto, se le asigna el valor de "1". Para las demás casillas se debe mantener un orden coherente. Por ejemplo, si se tienen dos criterios  $O_i$  y  $P_j$ , donde el criterio  $O_i$  es fuertemente más importante que el criterio  $P_j$ , la matriz sería la siguiente:

$$\begin{matrix} & O_i & P_j \\ O_i & \begin{bmatrix} 1 & 3 \end{bmatrix} \\ P_j & \begin{bmatrix} 0.33 & 1 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

Para cada matriz pareada se debe verificar la consistencia. Se dice que la matriz de comparaciones pareada es consistente cuando los valores dentro de la matriz cumplen que  $a_{ij} \cdot a_{jk} = a_{ik}$ ,  $\forall i, j, k$  siendo  $i, j, k = 1, 2, \dots, n$ . Esta condición genera una matriz normalizada con columnas idénticas. La evaluación de consistencia se realiza calculando un índice no estadístico denominado razón de consistencia (CR), el cual equivale al cociente entre el índice de consistencia (CI) y el índice de consistencia aleatorio (RI). La razón de consistencia es aceptable si es menor o igual a 0.1. En caso contrario, quien evalúa debe reconsiderar y modificar sus juicios sobre las comparaciones que realiza ya que esto indica que se favorece en exceso una o varias alternativas. Es decir,

hay sesgos en la selección [12]. La forma de calcular estos índices es la siguiente:

$$CI = \frac{n_{max} - n}{n - 1} \quad (1)$$

$$RI = \frac{1.98(n - 2)}{n} \quad (2)$$

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (3)$$

Donde, CI es el índice de consistencia de la matriz,  $n_{max}$  se calcula como la multiplicación de la matriz pareada por los pesos de cada alternativa o criterio de decisión,  $n$  es el orden o dimensión de la matriz cuadrada, RI es el índice de consistencia aleatoria y CR es la razón de consistencia de la matriz.

Después de construir las matrices pareadas de criterios y alternativas se procede a normalizarlas. Esta normalización se realiza con el fin de que este proceso genere escalas de razón que capturen la realidad percibida y no sean asignados números arbitrariamente. Para normalizar la matriz se divide cada elemento  $a_{ij}$  entre la sumatoria de los elementos que componen la columna  $j$ . Por ejemplo, si "A" es una matriz cuadrada de  $n$  filas y columnas, la matriz normalizada "A'" se construiría de la siguiente forma:

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & \dots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix} \quad A' = \begin{bmatrix} a'_{11} & \dots & a'_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a'_{n1} & \dots & a'_{nn} \end{bmatrix}$$

$$P = \text{Peso Promedio } (A') = \begin{bmatrix} \text{Prom}(a'_{11}) & \dots & a'_{1n} \\ \vdots & \cdot & \vdots \\ \text{Prom}(a'_{n1}) & \dots & a'_{nn} \end{bmatrix}$$

Donde,

$$a'_{11} = \frac{a_{11}}{\sum_{i=1}^n a_{i1}} = \frac{a_{11}}{a_{11} + \dots + a_{n1}}$$

Posteriormente, de cada matriz se genera un nuevo vector columna denominado "Peso promedio, P", el cual se conforma por los promedios de las filas. Cada elemento del vector columna corresponde al promedio de los elementos de la respectiva fila de la matriz  $A'$ .

$$P = \begin{bmatrix} P_{11} \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ P_{n1} \end{bmatrix}$$

En el caso de la matriz de criterios, el vector "Peso promedio" representa el peso de cada criterio en la selección. El criterio con mayor peso será el que defina el resultado. Para las matrices pareadas de alternativas, este vector será la calificación que obtenga cada alternativa para el criterio evaluado. Este vector se calcula de la siguiente forma:

Para calcular el puntaje final de cada alternativa se realiza la sumatoria del desempeño ponderado en cada criterio. Es decir, la suma de la multiplicación entre la calificación obtenida y el peso del criterio evaluado.

Para comprender mejor la aplicación del Proceso Analítico Jerárquico en cuanto a la construcción de la matriz pareada, la normalización de las matrices y ponderación de criterios se aconseja revisar el documento realizado por Hurtado [13] y consultar el trabajo realizado por Moreno [12] sobre los fundamentos, la metodología y aplicaciones del Método AHP.

### 2.3.2. Selección del modelo

A partir de la evaluación bibliográfica se eligieron cinco criterios de evaluación, presentados en la Tabla 2. Estos criterios se enfocan en seleccionar un modelo económico de fácil acceso y fácil manejo para el usuario que permita determinar el comportamiento hidrológico de un techo verde.

**Tabla 2.** Criterios de evaluación

CRITERIO	SUBCRITERIO	ASPECTO A EVALUAR	OBSERVACIONES/EXPLICACIÓN
Datos de entrada	Parámetros considerados	Cantidad e idoneidad de los parámetros de ingreso considerados	Estos parámetros permitirían ejecutar diferentes eventos de lluvia. No obstante, se debe considerar la dificultad para recopilar datos del techo verde antes y durante un evento de lluvia, Por lo tanto, estas variables serían las mínimas necesarias para modelar
Atributos	Clasificación del modelo	Distribuido, semi-distribuido, agregado	En el modelamiento hidrológico de TV se debería considerar que la estructura se compone de sustrato, geotextil, capa vegetal y una capa impermeable. Estas superficies tienen distintas propiedades que afectan el flujo de la escorrentía. Lo ideal sería que el modelo tenga en cuenta dichas propiedades en los cálculos.
	Conexiones	Posibilidad de conectarse con otros modelos	Este elemento permitiría importar información desde otras plataformas o exportar los resultados de la modelación, ampliando los campos de aplicación de las investigaciones.
	Costo	Posibilidad de replicar los resultados (gratuidad del modelo)	Permitiría que otros investigadores, entidades públicas o personas naturales, tengan la capacidad de replicar los resultados de la modelación
Datos de salida	Parámetros modelados	Cantidad e idoneidad de los parámetros modelados	Dependiendo del objetivo de la investigación se requieren ciertos parámetros. Sin embargo, debido a la naturaleza de los techos verdes se busca modelar parámetros como escorrentía drenada por el techo, calidad del agua infiltrada, agua almacenada, humedad del suelo, entre otros.

A partir de la información recopilada en la encuesta a expertos investigadores (sección 2.2.) se construyen la matriz de criterios y cinco matrices de alternativas, en las cuales se evalúan los modelos elegidos respecto a los cinco subcriterios presentados en la tabla 2. Para esto se definió una escala de correspondencia (ver Tabla 3) en la cual se relacionan los puntajes asignados por los expertos con la escala de preferencias presentada en la Tabla 1. Para los criterios, la conversión se realiza con

base en la diferencia entre los puntajes promedio que obtuvo cada criterio. Por ejemplo, suponiendo que dos criterios obtienen el mismo puntaje promedio, la diferencia sería de 0 y en la matriz pareada se colocaría un valor de 1 en la celda correspondiente dado que ambos criterios tienen igual importancia. Del mismo modo se construyen las matrices pareadas para los modelos evaluados, si dos modelos obtienen el mismo puntaje para un mismo aspecto en la celda respectiva se coloca 1.

**Tabla 3.** Tabla de conversión para la calificación

Diferencia entre los puntajes	Escala numérica (Tabla 1)	Expresión verbal
0	1	Igual importancia
1	2	Moderadamente más importante
2	3	Fuertemente más importante un elemento que en otro
3	4	Mucho más fuerte la importancia de un elemento que del otro
4	5	Importancia extrema de un elemento frente al otro

Cada matriz pareada fue normalizada y se evaluó su consistencia calculando el índice de consistencia CI, la consistencia aleatoria RI y la razón de consistencia RC como se explicó en la sección 2.3.1. A partir de este proceso se seleccionó el modelo que tiene mejor desempeño en la modelación de techos verdes de acuerdo a los criterios seleccionados.

### 3. RESULTADOS

#### 3.1 Consulta bibliográfica

Al realizar la consulta bibliográfica se encontró que en países estacionales se emplean modelos para simular los picos de escorrentía, capacidad de almacenamiento y tiempo de retención de los techos verdes durante eventos de lluvia. La modelación de techos verdes ha sido realizada exitosamente en ciudades como Toronto, Paris, Seattle, Portland, Vancouver, Auckland y New York [14]. Para esto se han empleado modelos de balance hídrico como el *Soil Water Apportioning Method* (SWAM) [15] y *Soil, Water, Atmosphere and Plant model* (SWAP)[16], [17]. También se han ejecutado modelos de softwares comerciales como *Mike Urban* [18], EPA SWMM [19]–[24], HYDRUS 1D [25]–[28] y SWMS 2D [29].

Existen otros modelos que pueden ser implementados para este tipo de análisis, como el software WinSLAMM [30], el cual permite modelar distintos tipos de SUDS y recientemente ha integrado el análisis de techos verdes. El software SUSTAIN ha sido empleado para estudiar otros sistemas de desarrollo de bajo impacto (*Low impact development, LID*) como depósitos de retención, cunetas verdes y pavimentos permeables [31]. A partir de esta consulta inicial se investigaron las principales características de cada modelo (ver tabla 4) con el fin de ejecutar la comparación pareada mediante la metodología AHP. Cabe resaltar que algunos paquetes comerciales como SewerGEMS, XPSWMM o Infoworks C no se tuvieron en cuenta debido a que no habían sido empleados en investigaciones relacionadas específicamente con modelación de techos verdes [32]. No obstante, se recomienda tenerlos en cuenta en futuras investigaciones que quizás requieran el uso de sistemas de información geográfica o que contemplen el modelado de calidad del agua proveniente de SUDs en sistemas de drenaje urbanos.



**Tabla 4.** Resumen de los modelos analizados

Nombre del Modelo	Entradas del Modelo	Atributos	Salidas del Modelo	Referencia
<b>SWAM (Soil Water Apportioning Method)</b>	Precipitación	Modelo Agregado	Diferencia de almacenamientos	[15]
	Características del suelo (humedad)		Escorrentía	
	Capacidad de almacenamiento		ET	
	Escalas de Tiempo			
<b>SWMM (Storm Water Management Model)</b>	Precipitación	Modelo semi-distribuido	Escorrentía	[14], [20], [21], [23], [24], [31], [33],[34], [35]
	ET	Conexión con GIS.	Infiltración	
	Temperatura	Exporta datos a Microsoft Excel.	Humedades finales del suelo	
	Variables de Cobertura Vegetal	Software libre		
	Variables del Sustrato. Variables de geotextil	Desarrollado por USEPA		
<b>HYDRUS 1-D</b>	Precipitación	Modelo Distribuido	Simulaciones uni y bidimensionales del agua	[25]–[28]
	ET	Exporta datos en formato texto.	Distribución de solutos en medio saturados	
	Capacidad de almacenamiento	Software libre		
	Fracción de los tipos de suelo	desarrollado por USDA ARS		
	Concentraciones de Solute			
<b>SWAP (Soil, Water, Atmosphere, Plant)</b>	Concentraciones de solutos	Modelo Agregado. Software libre	Información para modelos de transporte (PEARL o ANIMO)	[16], [17]
	Procesos de Distribución (Dispersión, Adsorción, convección y descomposición)	desarrollado por Wageningen	Simula el flujo de calor del suelo	
<b>SWMS 2-D</b>	Concentraciones de Solute	Modelo Semi-distribuido. Software libre	Movimientos de agua y solutos en medio insaturados, parcialmente saturados, y saturados	[29], [36]
	Permeabilidad del suelo	desarrollado por USDA ARS		
	Grados de saturación			
<b>MIKE URBAN</b>	Datos meteorológicos	Modelo Semi distribuido	Escorrentía	[18], [37], [38]
	Variables del Suelo	Conexión con plataforma (SIG) .	ET	
		Requiere licencia, gratuita durante 30 días	Infiltración	
		desarrollado por DHI	Flujo superficial Flujo de desagüe Balances de masa	
<b>WinSLAMM</b>	Precipitación (datos NOAA)	Modelo Semi distribuido	Escorrentía	[30], [39]
	Dimensiones	Conexión con plataformas SIG (paquete ArcSLAMM)	Drenado	
	Variables del suelo	Costo de la licencia por \$300 dólares	ET	
	Vegetación	desarrollado por PV Associates	Análisis del flujo que pasa por los vertederos	

Nombre del Modelo	Entradas del Modelo	Atributos	Salidas del Modelo	Referencia
<b>SUSTAIN System for Urban Storm Water Treatment and Analysis Integration</b>	Precipitación Variables topográficas. Variables del sustrato	Modelo Distribuido o agregado Compatible con ArcGIS, SWMM y HSPF Software libre. desarrollado por USEPA	Enrutamientos del flujo. Infiltración Evapotranspiración Enrutamiento y eliminación de contaminantes Sedimentos atrapados Eliminación de contaminantes	[31], [40]

### 3.2 Valoración del desempeño de cada modelo por parte de expertos

Durante la valoración de criterios se obtuvo respuesta de cinco investigadores, que resolvieron la encuesta

enviada en formato digital, la universidad a la que están vinculados y el perfil profesional de dichos investigadores se presenta en la tabla 5. Esta información es relevante para el proyecto en la medida en que permite verificar la experiencia que tienen los encuestados en cuanto a investigación sobre SUDS en Colombia.

**Tabla 5.** Información de los expertos investigados

UNIVERSIDAD	LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN
Pontificia Universidad Javeriana (Colombia)	Hidrología Urbana, gestión de acueductos y alcantarillado, sistemas sostenibles de drenaje urbano, aprovechamiento de aguas lluvia.
Universidad Nacional de Colombia (Colombia)	Hidrología y modelación matemática para la operación y control de sistemas de ingeniería ambiental conducentes al manejo de los recursos hídricos, gestión de los recursos hídricos, sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible, uso de recursos hidráulicos y teoría de las singularidades. Encuesta resuelta por dos investigadores.
Pontificia Universidad Católica de Chile (Chile)	Hidrología e Hidráulica Urbana, procesos hidrológicos, modelación lluvia-escorrenría
Universidad de los Andes (Colombia)	Hidrología, manejo sostenible de sistemas de abastecimiento y aguas residuales y pluviales, caracterización, modelación, análisis y sostenibilidad de hidro sistemas y ecosistemas

### 3.3 Selección del modelo

De acuerdo a lo explicado en la metodología, se construyó la matriz de criterios (Tabla 6) y se calculó su matriz normalizada (Tabla 7).

**Tabla 6.** Matriz de Criterios de evaluación

Criterios de Evaluación	Datos de Entrada	Atributos	Datos de Salida
Datos de Salida	0.33	0.5	1
Atributos	0.5	1	2
Datos de Entrada	1	2	3

**Tabla 7.** Matriz de Criterios de evaluación normalizada

Criterios de Evaluación	Datos de Entrada	Atributos	Datos de Salida	Peso promedio
Datos de Salida	0.182	0.14	0.17	0.164
Atributos	0.273	0.29	0.33	0.297
Datos de Entrada	0.545	0.57	0.50	0.539
			$\Sigma$	1.000

En la asignación de valores los expertos investigadores les dieron prioridad a los datos de entrada respecto a los atributos y a los datos de salida debido a que el

objetivo es modelar el comportamiento hidrológico de los techos verdes a partir de la información disponible. Lo anterior puede verse reflejado en el valor del peso promedio resaltado en color azul, el cual corresponde a 0.539 para los datos de entrada, interpretándose como el 53.9 % de influencia.

El siguiente criterio de mayor importancia fueron los atributos del modelo, debido a que la gratuidad del modelo y la posibilidad de integrar el modelo con otro software que incluya el uso de sistemas de información geográfica o poder exportar los datos, resultaría muy útil para ampliar el campo de aplicación en futuras investigaciones.

Posteriormente, para la construcción de las matrices se tomaron en cuenta los subcriterios mencionados en la Tabla 2 de criterios de evaluación. Para cada elemento se evaluó que el modelo cumpliera o no con la preferencia especificada en dicha tabla de acuerdo a los evaluado por los expertos.

De forma ilustrativa a continuación se presenta la matriz pareada del subcriterio “Parámetros considerados” que corresponden a los datos de entrada (Tabla 8), su matriz normalizada (Tabla 9) y los parámetros de consistencia calculados para esta matriz (Tabla 10).

**Tabla 8.** Matriz pareada para el elemento de Parámetros considerados”

	Parámetros Considerados (A)								
<b>SWAM</b>	1.0	0.5	0.5	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.83
<b>SWMM</b>	2.0	1.0	1.0	2.0	2.0	1.0	2.0	1.0	1.38
<b>HYDRUS 1-D</b>	2.0	1.0	1.0	2.0	2.0	1.0	2.0	1.0	1.38
<b>SWAP</b>	1.0	0.5	0.5	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.83
<b>SWMS 2-D</b>	1.0	0.5	0.5	1.0	1.0	0.5	1.0	0.5	0.69
<b>MIKE URBAN</b>	1.0	1.0	1.0	1.0	2.0	1.0	2.0	1.0	1.17
<b>WINSLMM</b>	1.0	0.5	0.5	1.0	1.0	0.5	1.0	0.5	0.69
<b>SUSTAIN</b>	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	2.0	1.0	1.09
<b>Sumatoria</b>	10	6.0	6.0	10	11	7.0	12	7.0	8.1

Las matrices pareadas para cada elemento considerado pueden solicitarse al correo del autor para correspondencia.

El resultado final de este proceso de jerarquización se presenta en la tabla 10, las columnas corresponden al vector “Peso promedio” de las matrices de alternativas generadas. Se debe tener en cuenta que la gratuidad del software, relación con otros modelos y la clasificación del modelo son subcriterios que pertenecen al criterio de “Atributos”. Por lo cual fueron promediados para obtener el puntaje correspondiente a dicho criterio. Para el cálculo del puntaje final se multiplica el valor de la columna por el peso de cada criterio y se suman, por lo tanto, es un puntaje ponderado.

**Tabla 9.** Matriz de “Parámetros considerados” normalizada.

	Parámetros Considerados – Normalizada								
Modelos Matemáticos	SWAM	SWMM	HYDRUS 1-D	SWAP	SWMS 2-D	MIKE URBAN	WINSLMM	SUSTAIN	Peso Promedio
<b>SWAM</b>	0.10	0.08	0.08	0.10	0.09	0.14	0.08	0.14	0.10
<b>SWMM</b>	0.20	0.17	0.17	0.20	0.18	0.14	0.17	0.14	0.17
<b>HYDRUS 1-D</b>	0.20	0.17	0.17	0.20	0.18	0.14	0.17	0.14	0.17
<b>SWAP</b>	0.10	0.08	0.08	0.10	0.09	0.14	0.08	0.14	0.10
<b>SWMS 2-D</b>	0.10	0.08	0.08	0.10	0.09	0.07	0.08	0.07	0.09
<b>MIKE URBAN</b>	0.10	0.17	0.17	0.10	0.18	0.14	0.17	0.14	0.15
<b>WINSLMM</b>	0.10	0.08	0.08	0.10	0.09	0.07	0.08	0.07	0.09
<b>SUSTAIN</b>	0.10	0.17	0.17	0.10	0.09	0.14	0.17	0.14	0.13

**Tabla 10.** Indicadores de consistencia para la matriz de “Parámetros considerados”

$n_{Max}$	<b>8.047</b>
<b>n (dimensión de la matriz)</b>	8
<b>Índice de consistencia (CI)</b>	0.007
<b>Consistencia Aleatoria (RI)</b>	1.485
<b>Razón de consistencia (RC)</b>	0.005
<b>Conclusión</b>	
<b><i>Inconsistencia aceptable</i></b>	
<b><i>(La matriz no es sesgada)</i></b>	

Como parte de las observaciones realizadas por los expertos se encuentra que la idoneidad del modelo depende en gran medida del objetivo de la modelación, puesto que algunos modelos hidrológicos tienen gran desempeño calculando la cantidad de agua, pero pueden tener menor calificación al considerar el flujo de contaminantes a través del techo o la calidad de la escorrentía que se genera. De la misma forma, algunos comentaron que se debería tener en cuenta la facilidad para manejar la plataforma, modificarla de acuerdo a las necesidades de la investigación y para recopilar los datos de entrada, dado que esto influye en gran medida al momento de seleccionar un modelo para realizar una investigación.

En la Tabla 11 se presentan los puntajes obtenidos por cada modelo. El mejor desempeño lo tuvo el modelo desarrollado por la USEPA SWMM, seguido de HYDRUS 1D y SUSTAIN. Estos modelos tienen en común que son gratuitos y permitirían modelar la retención de agua lluvia en distintas escalas de tiempo. SWMM y HYDRUS, al haber sido diseñados por la USEPA, son gratuitos y permiten exportar los datos a otros formatos, esto representa una ventaja para el criterio de “atributos”.

**Tabla 11.** Puntaje de los modelos evaluados

Modelo Matemático	Criterio			Puntaje Total
	Datos de Entrada	Atributos (0.297)	Datos de Salida (0.164)	
<b>SWMM</b>	0.171	0.177	0.153	0.170
<b>HYDRUS 1-D</b>	0.171	0.183	0.092	0.162
<b>SUSTAIN</b>	0.135	0.188	0.166	0.155
<b>MIKE URBAN</b>	0.146	0.100	0.166	0.135
<b>WINSLAMM</b>	0.085	0.097	0.166	0.102
<b>SWAP</b>	0.103	0.099	0.071	0.097
<b>SWAM</b>	0.103	0.060	0.111	0.092
<b>SWMS 2-D</b>	0.085	0.097	0.077	0.087
			$\Sigma$	1.000

#### 4. DISCUSIÓN

Para la matriz de parámetros considerados (Datos de entrada) los modelos que tuvieron el mayor puntaje fueron SWMM Y HYDRUS 1D, con 0.17 y 0.162 respectivamente. La principal ventaja de estos modelos es que para realizar la modelación sólo requieren parámetros climatológicos, dimensiones del techo verde y características del sustrato. Algunos expertos encuestados argumentaron que a menor cantidad de parámetros de ingreso es más factible poder ejecutar el modelo utilizando valores reales medidos en campo. Los modelos que tuvieron menor desempeño en este parámetro fueron SWMS 2D y WinSLAMM. El primero no tiene en cuenta la composición del sustrato ni la vegetación presente en el techo verde, mientras que WinSLAMM obtiene los datos climatológicos principalmente del NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) y se centra en el transporte de contaminantes en redes de drenaje urbano lo cual no se podría considerar como una prioridad en la modelación del comportamiento hidrológico del techo verde.

Para la matriz de clasificación del modelo la mayoría tuvieron el mismo puntaje excepto SWAM, el cual obtuvo el puntaje más bajo (0.057) ya que es un modelo agregado y no considera la variación entre las propiedades del suelo. Por otro lado, HYDRUS y SUSTAIN tuvieron una mejor calificación al ser modelos distribuidos. Respecto a la posibilidad de conectarse con otros modelos o software, los modelos que no presentan esta posibilidad son SWAM, SWAP y SWMS 2D. En cuanto a la gratuidad del modelo, Mike Urban y WinSLAMM requieren del pago de una licencia para su uso, mientras que SWAM es un modelo que requiere ser solicitado a los autores, por lo que se consideraría que no es de uso libre. En la matriz de parámetros modelados, HYDRUS, SWAP y SWMS 2D tuvieron una baja calificación relativa, ya que los demás modelos permiten determinar el agua almacenada dentro del techo verde y modelar la escorrentía en función del tiempo.

La razón de consistencia de las matrices permite asegurar que hay coherencia entre los valores asignados para cada modelo respecto a los demás. Si un modelo tiene una calificación de 1 respecto a otro, ambos modelos deben tener la misma calificación respecto a los demás modelos. La inconsistencia puede deberse a

que fue necesario redondear los números decimales al calcular la diferencia entre los puntajes de los modelos. Al haber empelado encuestas con escalas numéricas fue fácil construir las matrices pareadas y en todos los casos se obtuvieron valores muy bajos de RC (<0.1). Esto indica que no hay sesgo en la calificación. Por otro lado, la matriz que tuvo el valor más alto de RC fue la de "Costo" con un valor de 0.015. La principal dificultad para calificar los modelos fue tener en cuenta varias preferencias en un mismo subcriterio sin ser subjetivos. Sin embargo, en todos los casos la razón de consistencia tuvo un valor aceptable.

### CONCLUSIONES

En conclusión, el modelo que tuvo el mejor puntaje respecto a los criterios evaluados fue SWMM 5.1, ya que su módulo de LID-Control permite modelar los techos verdes considerando variables de vegetación, variables del sustrato, varios eventos de lluvia continuos además de ser un software libre. Sin embargo, hubo otros modelos, como HYRDUS 1-D, SUSTAIN Y MIKE URBAN, que tuvieron gran desempeño en esta evaluación y que por sus características permitirían realizar investigaciones amplias e integrales sobre este tipo de SUDS en zonas intertropicales.

### AGRADECIMIENTOS

Manifestamos nuestros sinceros agradecimientos a los investigadores por su dedicación y tiempo empleado para desarrollar la encuesta suministrada. A la Universidad de La Salle por su apoyo y su compromiso con la formación académica y personal de los profesionales.

### REFERENCIAS

- [1] M. Molina, L. Gutiérrez, and J. Salazar, "Sistema Urbanos de Drenaje Sostenible," *Ambient. Secr. Dist. Medio*, 2011.
- [2] A. Torres, S. Méndez-Fajardo, Á. P. Gutiérrez Torres, and S. Sandoval, "Quality of Rainwater Runoff on Roofs and Its Relation to Uses and Rain Characteristics in the Villa Alexandra and Acacias Neighborhoods of Kennedy, Bogota, Colombia," *J. Environ. Eng.*, 2013.
- [3] B. Woods-Ballard, R. Kellagher, P. Martin, C. J. R. Bray, and P. Shaffer, *The SUDS manual - UK*. 2007.
- [4] D. Butler and J. Davies, *Urban Drainage*. 2011.
- [5] J. Niemczynowicz, "Urban hydrology and water management – present and future challenges," *Urban Water*, 1999.
- [6] N. Oviedo and A. Torres, "Hydric Attenuation and Hydrological Benefits for Implementing Productive Green Roof in Soacha, Colombia," *Ing. y Univ.*, 2014.
- [7] H. F. Castletona, V. Stovinb, S. B. M. Beckc, and J.B. Davisonb, "Green roofs; building energy savings and the potential for retrofit," *Energy Build.*, 2010.
- [8] T. L. Saaty and J. Wiley, "Proceso De Análisis Jerárquico (Ahp)," *Rev. Digit. UMMSM*, 2009.
- [9] T. Sangkakool, K. Techato, R. Zaman, and T. Bruderermann, "Prospects of green roofs in urban Thailand – A multi-criteria decision analysis," *J. Clean. Prod.*, 2018.
- [10] L. Katherine, O. Rojas, L. Fernanda, and B. Chimbi, "ANÁLISIS EXPLORATORIO DE MODELOS PARA LA ESTIMACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN POR CARGAS DIFUSAS EN UN ÁREA DE ESTUDIO CON INFORMACIÓN ESCASA."
- [11] Juan C. Osorio y Juan P. O, "El Proceso De Análisis Jerárquico (Ahp) Y La Toma De Decisiones Multi-criterio. Ejemplo De Aplicación.," *Sci. Tech.*, 2008.
- [12] J. Moreno, "El Proceso Analítico Jerárquico ( AHP). Fundamentos, metodología y aplicaciones," *Univ. Zaragoza*, 2002.
- [13] G. B. Toskano Hurtado, "EL PROCESO DE ANÁLISIS JERARQUICO (AHP) COMO HERRAMIENTA PARA LA TOMA DECISIONES EN LA SELECCIÓN DE PROVEEDORES," 2005.
- [14] S. S. Cipolla, M. Maglionico, and I. Stojkov, "A long-term hydrological modelling of an extensive green roof by means of SWMM," *Ecol. Eng.*, 2016.
- [15] R. Hakimdavar, P. J. Culligan, A. Guido, and W. R. McGillis, "The Soil Water Apportioning Method (SWAM): An approach for long-term, low-cost monitoring of green roof hydrologic performance," *Ecol. Eng.*, vol. 93, pp. 207–220, Aug. 2016.
- [16] J. G. Kroes, J. G. Wesseling, and J. C. Van Dam, "Integrated modelling of the soil-water-atmosphere-plant system using the model SWAP 2.0 an overview of theory and an application," in *Hydrological Processes*, 2000.
- [17] J. Wesseling, J. G. Kroes, and K. Metselaar, "Global sensitivity analysis of the Soil-Water-Atmosphere-Plant (Swap) model," *Wageningen, SC-DLO, 1998. Rep. 160, 70 pp*, 1998.
- [18] L. Locatelli, O. Mark, P. S. Mikkelsen, K. Arnbjerg-Nielsen, M. Bergen Jensen, and P. J. Binning,

- "Modelling of green roof hydrological performance for urban drainage applications," *J. Hydrol.*, 2014.
- [19] K. Alfredo, F. Montalto, and A. Goldstein, "Observed and Modeled Performances of Prototype Green Roof Test Plots Subjected to Simulated Low and High-Intensity Precipitations in a Laboratory Experiment," *J. Hydrol. Eng.*, 2010.
- [20] E. Burszta-Adamiak and M. Mrowiec, "Modelling of Green roofs' hydrologic performance using EPA's SWMM," *Water Sci. Technol.*, 2013.
- [21] A. Palla and I. Gnecco, "Hydrologic modeling of Low Impact Development systems at the urban catchment scale," *J. Hydrol.*, 2015.
- [22] A. Bonoli, A. Conte, M. Maglionico, and I. Stojkov, "Green roofs for sustainable water management in urban areas," *Environ. Eng. Manag. J.*, 2013.
- [23] G. Krebs, T. Kokkonen, M. Valtanen, H. Setälä, and H. Koivusalo, "Spatial resolution considerations for urban hydrological modelling," *J. Hydrol.*, 2014.
- [24] P. A. Versini, D. Ramier, E. Berthier, and B. de Gouvello, "Assessment of the hydrological impacts of green roof: From building scale to basin scale," *J. Hydrol.*, 2015.
- [25] R. Hakimdavar, P. J. Culligan, M. Finazzi, S. Baroncini, and R. Ranzi, "Scale dynamics of extensive green roofs: Quantifying the effect of drainage area and rainfall characteristics on observed and modeled green roof hydrologic performance," *Ecol. Eng.*, 2014.
- [26] R. N. Hilten and T. M. Lawrence, "Using green roofs and other BMPs to reduce the need for stormwater retention capacity requirements," in *Low Impact Development: New and Continuing Applications - Proceedings of the 2nd National Low Impact Development Conference 2007*, 2008.
- [27] A. Palla, I. Gnecco, and L. G. Lanza, "Compared performance of a conceptual and a mechanistic hydrologic models of a green roof," *Hydrol. Process.*, 2012.
- [28] H. peng Qin, Y. nuan Peng, Q. ling Tang, and S. L. Yu, "A HYDRUS model for irrigation management of green roofs with a water storage layer," *Ecol. Eng.*, 2016.
- [29] A. Palla, I. Gnecco, and L. G. Lanza, "Unsaturated 2D modelling of subsurface water flow in the coarse-grained porous matrix of a green roof," *J. Hydrol.*, 2009.
- [30] R. Pitt and J. Voorhees, "The use of WinSLAMM to evaluate the benefits of low impact development," *Proceedings of the Low Impact Development Conference: Putting the LID on SWMM, College Park, MD, USA*. pp. 1–2, 2004.
- [31] C. F. Chen, M. Y. Sheng, C. L. Chang, S. F. Kang, and J. Y. Lin, "Application of the SUSTAIN model to a watershed-scale case for water quality management," *Water (Switzerland)*, 2014.
- [32] A. Abbas *et al.*, "Modelling data of an urban drainage design using a Geographic Information System (GIS)database," *J. Hydrol.*, 2019.
- [33] O. US EPA, "Storm Water Management Model (SWMM)," 2018.
- [34] D. J. Rosa, J. C. Clausen, and M. E. Dietz, "Calibration and Verification of SWMM for Low Impact Development," *J. Am. Water Resour. Assoc.*, 2015.
- [35] Z. Peng and V. Stovin, "Independent Validation of the SWMM Green Roof Module," *J. Hydrol. Eng.*, 2017.
- [36] U. S. D. of A. (USDA), "SWMS-2D Model : USDA ARS," 2016. [Online]. Available: <https://www.ars.usda.gov/pacific-west-area/riverside-ca/us-salinity-laboratory/docs/swms-2d-model/>. [Accessed: 13-Dec-2018].
- [37] B. Tomicic and H. S. Andersen, "Storm Water Runoff from Green Urban Areas Modellers' Guideline," Melbourne, Australia, 2015.
- [38] M. Just Kjølby, "Modellering af LAR anlæg samt modellering af stoffjernelse i LAR anlæg og bassiner Background & Objective."
- [39] P. & Associates, "WinSLAMM User's Guides." [Online]. Available: [http://www.winslamm.com/select\\_documentation.html](http://www.winslamm.com/select_documentation.html). [Accessed: 09-Dec-2018].
- [40] O. US EPA, "System for Urban Stormwater Treatment and Analysis Integration (SUSTAIN)," 2016.

# UNA REVISIÓN SISTEMÁTICA DE LITERATURA SOBRE LA GESTIÓN DE LA PROPIEDAD INTELECTUAL EN INSTITUCIONES DE EDUCACIÓN SUPERIOR

## A systematic literature review of Intellectual Property Management in Higher Education Institutions.

María Luisa Villalba Morales<sup>1</sup>, Francisco Javier Montoya<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Ingeniera Industrial, M.Sc. en Ingeniería. Docente, Programa de Administración de Empresas, Universidad Católica de Oriente. mvillalba@uco.edu.co.

<sup>2</sup>Ingeniero Administrador, M.Sc. en Ingeniería. Docente Investigador Escuela de Administración, CEIPA Business School (Sabaneta-Antioquia, Colombia). francisco.montoya@ceipa.edu.co

*(Recibido el 19 de Septiembre de 2018 y aprobado el 24 de Abril de 2019)*

### Resumen

Ante los nuevos desafíos que afrontan las Instituciones de Educación Superior (IES) como generadoras de conocimiento, la gestión de su Propiedad Intelectual (PI) toma relevancia, con el fin de promover la obtención de resultados favorables de las creaciones que se gestan con sus recursos y que se esperan sean usadas por la industria y la sociedad. Por ello, ha sido de interés para algunos investigadores poder comprender la complejidad de estos sistemas de gestión. En este trabajo se expone el estado del arte de la gestión de la PI en el contexto colombiano, apoyado en casos de IES en el mundo y Latinoamérica. Entre los hallazgos principales se encuentran: 1) una evidente transición del reconocimiento de la importancia de la gestión, hacia la propuesta de modelos de gestión, y 2) la necesidad de profundizar en la definición de estructuras que soporten la complejidad y particularidad de una IES.

**Palabras clave:** Instituciones de Educación Superior - IES, Sistemas de Gestión, Propiedad Intelectual - PI, estado del arte

### Abstract

Due to the new challenges faced by the Higher Education Institutions (HEIs) as generators of knowledge, the management of their Intellectual Property (IP) becomes relevant, in order to promote the obtaining of favorable results from the creations that are gestated with their resources and that are expected to be used by industry and society. Therefore, it has been interesting for some researchers to understand the complexity of these management systems. This paper exposes the state of the art of IP management in the Colombian context, supported by HEI cases in the world and Latin America. Among the main findings are: 1) a clear transition from the recognition of the importance of management to the proposal of management models, and 2) the need to deepen the definition of structures that support the complexity and particularity of an IES.

**Keywords:** Higher Education Institutions – HEIs, Management Systems, Intellectual Property (IP),

## 1. INTRODUCCIÓN

Como una de las consecuencias del avance tecnológico y la importancia del conocimiento como activo, la propiedad intelectual (PI) se ha convertido en un factor clave de competitividad para las empresas [1], lo que ha desatado la necesidad de realizar una adecuada gestión de aquellos recursos basados en el conocimiento, de tal modo, que los esfuerzos e inversiones enfocadas en la

protección y explotación de la propiedad intelectual se acojan a buenas prácticas de administración.

Aunque la anterior afirmación haga referencia a las empresas, lo cierto es que esta realidad no excluye a las instituciones de educación superior (IES), las cuales también se encuentran inmersas en los sistemas económicos y de innovación, por ser generadoras de conocimiento a través de sus acciones misionales: la

docencia, la investigación y la extensión; a las cuales, en las últimas décadas se le han sumado el emprendimiento y la creación de spin offs [2]. Por ello, y entre otras razones operacionales, se ven en la necesidad de contar con un sistema apropiado para la protección de su propiedad intelectual [3].

En este sentido, un sin número de IES en el mundo han ido tomando conciencia y han podido realizar acciones que conlleven a la adecuada estructuración y adaptación de un sistema de gestión de la propiedad intelectual, partiendo desde políticas claras y objetivos alcanzables, hasta llegar a la implementación de procesos e instrumentos de gestión adecuados a las características de cada universidad.

Específicamente, en el caso de las IES colombianas, se han realizado diferentes trabajos para medir el nivel de gestión de la PI. Entre estos trabajos destacan los realizados por [3], [4] y [5], que de forma aglomerada (sin definir universidades específicas para el estudio), aportan a la comprensión del panorama colombiano de la gestión la PI en IES.

No obstante, también se evidencia un alto número de estudios de casos específicos, es decir, trabajos en los cuales el objeto de estudio corresponde a un número finito de IES. Son estos casos los de interés de los autores, quienes han plasmado en este trabajo un compendio de dichos casos, con el fin de evidenciar las tendencias en cuanto a la Gestión de la PI, las metodologías empleadas y otros aspectos que sean relevantes en torno a la temática.

## 2. METODOLOGÍA

La metodología empleada en este trabajo es de carácter cualitativa sustentada en una investigación observacional y retrospectiva, con el objetivo de sintetizar investigaciones realizadas en el ámbito de la gestión de la propiedad intelectual en IES, teniendo en cuenta el contexto mundial, latinoamericano y colombiano. Para ello se siguieron las siguientes etapas:

### 2.1 Definición de la pregunta a responder

La pregunta planteada para ser resuelta con esta investigación se centra en la necesidad de conocer el rumbo que actualmente están tomando las investigaciones desarrolladas en cuanto a la gestión de la propiedad in-

telectual en IES, con el fin de identificar las tendencias en cuanto a enfoques y metodologías para valorar y/o analizar los diferentes casos estudiados y con ello poder identificar aspectos claves para las instituciones que aún no han iniciado el proceso de gestión de la propiedad intelectual. Con base en ello, la pregunta que se busca responder en esta investigación es:

¿Es posible identificar una evolución en los casos de estudio sobre gestión de la PI en IES colombianas en lo referente a objeto de estudio y enfoque?

### 2.2 Definición de las características de los casos estudio

Se incluyeron dentro de esta investigación los trabajos que cumplieran con los siguientes criterios:

- Tipo de diseño: se incluyen trabajos de análisis cualitativo y/o cuantitativo
- Tamaño de muestra: se incluyen casos que sean específicos (una sola IES), como también casos que muestren tendencias aglomeradas.
- Años de publicación: a partir del año 2008, para completar un periodo de análisis de ocho (8) años.

### 2.3 Búsqueda y selección de los casos

Se definieron tres fuentes de búsqueda para la identificación de los casos: 1) publicaciones en eventos académicos, 2) publicaciones de revistas científicas y 3) publicaciones de informes de entidades de fomento de la propiedad intelectual. La búsqueda se realizó en un periodo de tres meses: noviembre 2016 a enero de 2017. En total se seleccionaron 14 casos y cinco (5) trabajos de enfoque general, distribuidos así:

- Casos en el mundo: tres (3) casos.
- Casos en Latinoamérica: dos (2) casos
- Casos en Colombia: nueve (9) casos, más cinco (5) trabajos de enfoque general

### 2.4 Análisis de los hallazgos

Los hallazgos fueron analizados de dos formas:

- Casos en el mundo y Latinoamérica. Estos casos se revisaron y compararon con los documentos



disponibles, para algunos de ellos se encontró un solo documento.

- Casos colombianos. Se definieron cinco criterios de análisis (tipo de documento, año de publicación, número de IES estudiadas, metodología empleada y aspectos relevantes de la gestión de la PI)

### 3. RESULTADOS

De acuerdo a los casos hallados y analizados, se muestran los resultados, según el alcance de los mismos.

#### 3.1 En el mundo

A continuación se describen tres (3) casos sobre gestión de la propiedad intelectual en IES de tres países.

##### 3.1.1 Tailandia

Para las IES en Tailandia, los autores del trabajo [6] realizaron una propuesta general de estructuración de un departamento de propiedad intelectual y una serie de capacitaciones a los investigadores sobre la temática, en el año 2001.

La problemática que sustenta esta propuesta era que la mayoría de las universidades del país tienen dentro de sus campos de acción la biotecnología, área en la cual, las universidades generan valiosos conocimientos académicos; pero los estaban perdiendo en las negociaciones con las empresas extranjeras con las que realizaban la investigación [6].

En este sentido, la propuesta de los autores consistió en la implementación de cursos de gestión de la propiedad intelectual y el establecimiento de un departamento de propiedad intelectual, con el fin de estimular y activar a profesores e investigadores a tomar medidas para proteger sus descubrimientos en el área de la biotecnología [6].

Con base en ello, se identifica que los esfuerzos estaban orientados a la sensibilización de los investigadores y realizar los primeros esfuerzos por contar con una estructura visible de gestión. Esta condición se presentó en el año 2001, pero se asemeja al estado identificado en algunas de las IES colombianas entre el 2008 y el 2012, de acuerdo a los resultados de los estudios realizados por [4], [5], [7] y [8].

##### 3.1.2 Estados Unidos

Las Universidades en Estados Unidos, en su mayoría cuentan con políticas de propiedad intelectual. Un estudio realizado en el 2008, en el que se encuestaron científicos de nueve (9) universidades, concluye que las políticas universitarias, en cuanto a Propiedad Intelectual, son vehículos fundamentales para la gestión de las relaciones entre la industria y las universidades, con el fin de mejorar el largo plazo el bienestar económico y social de las universidades, sus científicos y empresas del sector privado. Lo anterior, teniendo en cuenta que: 1) En Estados Unidos existe una larga historia de registro y uso de patentes por parte de las Universidades (Ley Bayh-Dole). 2) La existencia de políticas de propiedad intelectual deben facilitar la transferencia tecnológica, permitir ingresos a la universidad, sin que se pierda la libertad académica y la promoción para la continuidad en la generación y perfeccionamiento de conocimiento [2], [9].

Pero no solo se quedan con políticas, también se han definido mecanismos de compensación para los profesores-investigadores, a través de las regalías que se obtienen de la comercialización de los productos desarrollados. Ejemplo de estas universidades son las Universidades de "California, Stanford, Columbia, Wisconsin, Washington, Michigan, Iowa, Massachussets, Florida, Harvard, Cornell y Colorado" [10].

Con base en lo anterior, se resalta el avance que tienen las universidades en Estados Unidos en cuanto a la Gestión de la Propiedad Intelectual. Lo cual se debe, no sólo a que las universidades identifican la importancia de gestionar la propiedad intelectual, sino también a los lineamientos definidos en las leyes de protección.

##### 3.1.3 Indonesia

De este país se tiene el caso de Bogor Agricultural University, una de las principales universidades, en un contexto de economía emergente, que juega un papel importante en el campo de la agricultura del país y tuvo un cambio estructural que le permitió llegar a ser una universidad basada en la investigación de clase mundial, lo que implica gestionar la innovación y la investigación. Por lo cual, la gestión de la propiedad intelectual toma relevancia, y para la Universidad fue necesario establecer mecanismos institucionales para gestionar los resultados de la investigación (investigaciones compartida, licencias, o emprendimientos tecnológicos)

y cuenta con una oficina de derechos de propiedad intelectual y publicaciones, la cual tuvo los siguientes desafíos: 1) Escaso personal con conocimientos en propiedad intelectual, habilidades en transferencia y marketing; 2) Poco conocimiento de los investigadores en protección y comercialización de los resultados de investigaciones, 3) Falta de una política de propiedad intelectual, y resultados en los laboratorios sin generación de prototipos [2].

Con base en ello se definió una política de propiedad intelectual en el año 2004, la cual incluye los actores que pueden participar en la generación de propiedad, la protección, la comercialización y los beneficios recibidos. Las acciones en este ámbito han evolucionado desde entonces y actualmente las políticas abarcan los trabajos en redes por fuera de la universidad [2].

Este caso puede convertirse en modelo de gestión replicable para las universidades colombianas, puesto que comparten el contexto de economías emergentes, la fortaleza en el sector de la agricultura y la transformación de las universidades hacia el enfoque investigativo y de emprendimiento. Adicional a ello, el caso refleja el trabajo que se ha venido realizando en la Universidad desde el año 2000 para fortalecer su sistema de Gestión de la propiedad intelectual y que éste se adapte a las condiciones cambiantes del entorno.

### 3.2 En Latinoamérica

A continuación se describen cuatro (4) casos sobre gestión de la propiedad intelectual en instituciones de educación superior de diferentes países latinoamericanos.

#### 3.2.1 Red de Propiedad Intelectual e Industrial en Latinoamérica (Red PILA)

La red PILA tiene como misión “Fortalecer la cooperación entre las IES de América Latina en todos los aspectos relacionados a Propiedad Intelectual (PI) e innovación, promoviendo la ayuda mutua para la consolidación de acciones de gestión de Propiedad Intelectual [11] Entre el 2009 y 2011 realizó un proyecto para diagnosticar el estado de la gestión de la propiedad intelectual en las Universidades, a través de la metodología AIDA, la cual se basa en el supuesto que existen cuatro (4) niveles de madurez para la gestión de la propiedad intelectual: Atención, Interés, Deseo y Acción. En este proyecto participaron 17 países (Argentina, Bolivia, Brasil, Chile,

Colombia, Costa Rica, Cuba, Ecuador, El Salvador, Honduras, México, Nicaragua, Panamá, Paraguay, Perú, Uruguay y Venezuela) [12].

En la investigación participaron 147 universidades, lo que permitió obtener valores en la escala de 1 a 10, siendo 10 el valor más alto que se puede obtener en las categorías de conocimiento, protección, gestión y explotación. Estos valores fueron ponderados y se obtuvo la media para cada país, donde el valor más alto, lo alcanzó Brasil (6,51) y el más bajo lo obtuvo Paraguay (0,78). En la Tabla 1 se muestran los valores para cada país.

Las principales conclusiones de este estudio se centran en la falta de formación a profesores, administrativos y estudiantes en temas de propiedad intelectual, bajos niveles de explotación de la propiedad intelectual y carencia de estructuras formales para la gestión de la propiedad intelectual en la mayoría de las universidades. Lo anterior, sustentado en factores nacionales, institucionales y operativos [7].

De este proyecto, también se realizaron estudios específicos por países. El caso colombiano ha sido tomado dentro de los documentos de análisis de este trabajo.

#### 3.2.2 Brasil

El inicio de la protección de los resultados de las investigaciones en las universidades públicas en Brasil inició en la década de los 80, y para el año 2007 el interés por la protección de la propiedad intelectual estaba en aumento, evidenciándose en el número de creaciones protegidas (Sabino & Ayuso, 2012).

Los autores [13] en el 2012 realizan un análisis comparativo entre la Universidad Federal de Goiás y la Universidad de Brasilia, con el fin de identificar si las universidades presentaban diferencias en cuanto a la gestión de la propiedad intelectual. Aunque emiten conclusiones sobre la existencia de diferencias significativas entre las universidades y la necesidad de considerar aspectos claves como la normalización interna, el apoyo de la dirección y el cambio de cultura, las variables empleadas para el estudio se limitaron a la existencia de políticas en propiedad intelectual, el perfil de los investigadores y el número de patentes registradas.

**Tabla 1.** Puntuación por país en el diagnóstico de gestión de la Propiedad Intelectual del proyecto PILA

Países	NIVEL AIDA				
	Conocimiento	Protección	Gestión	Explotación	Media
Argentina	8,33	4,19	5,15	3,54	5,3
Bolivia	2,44	0,96	1,26	1,15	1,45
Brasil	8,81	6,19	6,58	4,45	6,51
Chile	6,06	4,45	4,31	3,47	4,57
Colombia	8,06	3,89	3,68	2,91	4,63
Costa Rica	7,71	4,59	4,34	3,65	5,08
Cuba	7,01	4,48	3,56	2,99	4,51
Ecuador	7	4,43	4,52	3,26	4,8
El Salvador	5,08	1,62	1,4	1,58	2,42
Honduras	5,02	1,54	0,77	1,14	2,12
México	6,18	4,84	4,94	3,9	4,96
Nicaragua	5,5	3,01	3,15	2,53	3,55
Panamá	7,68	4,05	3,98	3,96	4,91
Paraguay	1,87	0,45	0,46	0,33	0,78
Perú	6,58	4,16	3,05	2,94	4,18
Uruguay	7,18	3,6	2,78	1,88	3,86
Venezuela	6,79	3,01	2,82	2,22	3,71
<b>Promedio</b>	<b>6,31</b>	<b>3,5</b>	<b>3,34</b>	<b>2,76</b>	<b>3,96</b>

Tomado de [7] pág. 23.

### 3.3 Colombia

El estudio de la gestión de la propiedad intelectual en las IES en Colombia tiene dos directrices. Se pueden encontrar trabajos enfocados al análisis general a nivel país, sea con el fin de mostrar el estado general de la gestión, o analizar factores que influyen en ella. Como también, se encuentran trabajos que buscan evidenciar casos específicos, de una o varias IES en cuanto a su situación particular para la gestión de la Propiedad Intelectual.

En la Tabla 2 se muestra el paralelo de los estudios analizados; de los cuales, seis (6) son estudios a nivel nacional, mientras que 10 son casos, ya sean aglomerados o específicos.

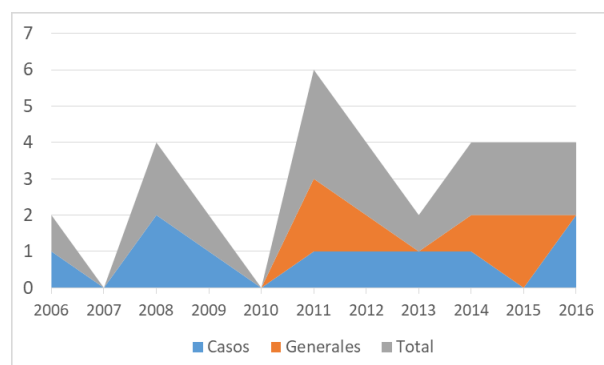
Los estudios de análisis general, han sido publicados entre el año 2011 y el año 2015, mientras que los casos se encuentran entre el año 2006 y 2016, con comportamiento variable en cuanto a la frecuencia anual (ver Gráfica 1).

**Tabla 2.** Estudios de la Gestión de la Propiedad Intelectual en Colombia

<b>Análisis general</b>		<b>Casos</b>	
[10]	El estado de La Propiedad Intelectual en las Universidades Colombianas.	[18]	Algunos efectos de la Gestión Tecnológica en la producción Industrial y el papel de la educación para su apropiación en Colombia
[14]	Modelos y mecanismos de interacción universidad-empresa-Estado: retos para las universidades colombianas	[19]	Importancia de la propiedad intelectual en la Universidad Católica de Colombia
[15]	La Propiedad Intelectual en las Universidades: Nuevos centros de innovación, emprendimiento y transferencia de tecnología; titularidad de derechos y legislación.	[4]	La propiedad intelectual en las economías universitarias
[16]	Guía Estretegica de Propiedad Intelectual. Universidad Empresa	[20]	Análisis del nivel de concientización y uso de la PI en las IES: Necesidades Formativas
[3]	La Gestión Universitaria de la Propiedad Intelectual en Colombia	[21]	El estado de La Propiedad Intelectual en las Universidades Colombianas
[17]	Desafíos de la política pública colombiana frente a la transferencia de resultados de investigación universitaria	[8]	La Gestión de la Propiedad Intelectual en las Universidades Colombianas: El caso de la Universidad Industrial de Santander
		[5]	El Patentamiento Universitario en Colombia
		[22]	Determinantes de la transferencia de propiedad industrial al sector productivo en universidades públicas colombianas
		[23]	Diagnóstico del Sistema de Gestión de la Propiedad Intelectual Universitaria: Caso Universidad de San Buenaventura
		[24]	Importancia de un Modelo de Gestión de Propiedad Intelectual en una Institución De Educación Superior: Caso Instituto Tecnológico Metropolitano

Fuente: Elaboración propia

**Gráfica 1.** Frecuencia anual de trabajos enfocados en la Gestión de la Propiedad Intelectual.



Fuente: Elaboración propia

### 3.3.1 Trabajos de análisis general

Los trabajos de análisis general a nivel país buscan aportar al conocimiento de la Gestión de la Propiedad Intelectual en las IES colombianas, sin entrar en detalles de las mismas. Este tipo de trabajo tuvo su mayor producción en el año 2011 (aunque entre los años 2008 y 2010 ya se contaba con estudios de casos específicos).

El trabajo [21] ofrece un panorama del nivel de conocimiento, protección, gestión y explotación de la Propiedad Intelectual. Entre los principales hallazgos se resalta la carencia generalizada de políticas y un alto desconocimiento de la temática por parte de los integrantes de las IES. Estos resultados desatan el interés por la realización de estudios a profundidad y comparativos entre IES, con el fin de generar planes y cursos de capacitación. Con base a ello, se esperaba un crecimiento de los estudios en Gestión de la Propiedad Intelectual, sin embargo, para los años próximos, el número de trabajos generales disminuyó. En el 2011 también se realizó el estudio de [14] quienes, a través de un análisis de literatura identificaron los retos a los que se ven enfrentadas las IES colombianas, para interactuar con la empresa y el estado. Estos retos impactan directamente en la gestión de la propiedad intelectual, principalmente por la necesidad de políticas de protección, las cuales deben mejorar con relación a las establecidas en las IES de países desarrollados (ejemplo: Estados Unidos).

Con base en ello, toma relevancia el trabajo realizado por [15], puesto que busca comprender las implicaciones legales que conllevan las nuevas creaciones y dinámicas

de generación y transferencia de conocimiento (Centros de innovación, emprendimiento y transferencia tecnológica). Este trabajo, a diferencia de los anteriores, se centra en la aplicación de la normatividad que rige la propiedad intelectual para Colombia, más que para definir el estado de gestión de las IES.

Realizando un salto de dos años, se lanza una Guía de actuación [16] en temas Propiedad Intelectual, para ofrecer a universidades y empresas, pautas requeridas para la transferencia tecnológica y el trabajo en conjunto entre ellas. Aunque esta guía no indica el estado de las IES en cuanto a su nivel de gestión, contextualiza y describe las variables que se deben contemplar para garantizar la protección de la propiedad intelectual de las IES.

Para el año 2015, se realizaron dos publicaciones importantes. Una corresponde al trabajo realizado por [3] y la otra al trabajo realizado por [17]. De estos dos (2) trabajos, el primero está orientado a la descripción del contexto en el cual se ven inmersas las IES y que afectan la propiedad intelectual (Sistemas de gestión de PI, el Sistema Nacional de Innovación de Colombia, histórico de protección y uso de la PI generada en las Universidades, y buenas prácticas en gestión por parte de las IES); mientras que el segundo pone en manifiesto las falencias que tiene el país en cuanto a la asignación de recursos y mecanismos que permitan mejorar la interacción entre los actores del Sistema Nacional de Innovación, con base en las políticas gubernamentales relacionadas con la propiedad intelectual.

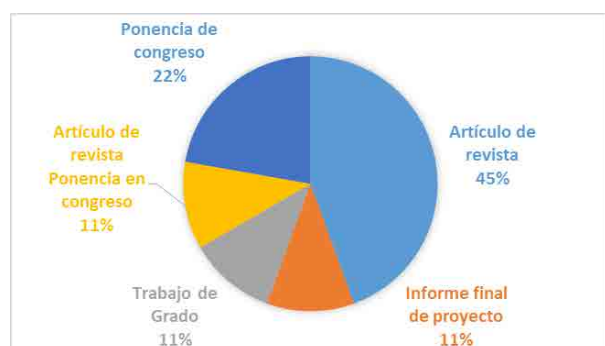
### 3.3.2 Casos

#### Generalidades

El aporte al conocimiento en cuanto a Gestión de la PI en las IES en Colombia, es realizado a través de diferentes tipos de documentos tal como se muestra en la Gráfica 2. De acuerdo a la distribución obtenida, se puede identificar la importancia de la temática en Colombia, puesto que además de contar con publicaciones en revistas indexadas, también se cuenta con informes de proyectos y ponencias. A esto se suma, que uno de los casos fue presentado en Congreso y por su impacto fue publicado (dos años después) en la revista *Journal of Technology Management & Innovation*, como un Special Issue ALTEC [5]. Sin embargo, la mayoría de los estudios son de nivel exploratorio (incluyendo los más actuales), lo que evidencia que es un tema en crecimiento para

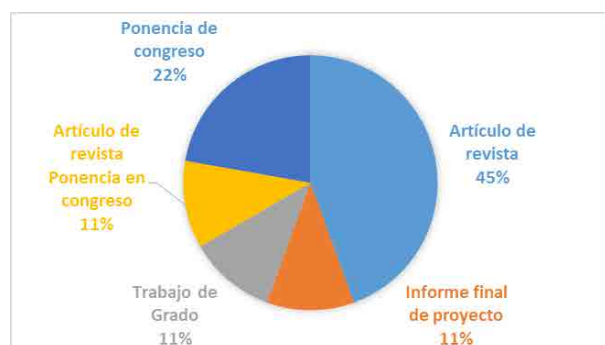
el contexto colombiano y estos trabajos apuntan a la generación de evidencia empírica. La cual tiene como fuente directa las IES, principalmente de casos puntuales o máximo tres (3) instituciones. En la Gráfica 3 se muestra la población de IES estudiadas.

Gráfica 2. Tipos de documentos de los casos publicados



Fuente: Elaboración propia

Gráfica 3. Número de IES estudiadas en los casos.



Fuente: Elaboración propia

De acuerdo al Sistema Nacional de Información de la Educación Superior, para el año 2017 existen en Colombia 289 IES activas. De los casos estudiados se pudieron identificar 17 IES, lo cual representa el 5.9% de la población total.

#### Metodologías empleadas

Los diseños metodológicos empleados en los nueve (9) casos mezclan el enfoque cualitativo y cuantitativo. Lo que permite emitir valoraciones comparables

entre las instituciones que fueron analizadas de forma aglomerada. Las fuentes definidas para las investigaciones principalmente corresponden a la información documental y el personal directivo e investigativo de las IES. Excepto, para aquellos casos en los que las universidades no son definidas, sino que se hace estudios de bases de datos de patentes o de marca.

En cuanto a los métodos de recolección y análisis de la información, se destaca la metodología AIDA y la metodología propuesta por [10]. La primera es de enfoque cuantitativo, usada en tres casos: [8], [20] y [21]. La segunda es de enfoque cualitativo, usada en un caso colombiano [24] y por los autores proponentes [1] en un caso mexicano. Ambas se describen en la Tabla 3. El resto de los casos se basan en metodologías sustentadas en el método científico o análisis de casos, en los cuales se incluye la realización de entrevistas o la revisión del histórico de patentes nacionales.

#### Aspectos relevantes de la Gestión de la PI

De acuerdo a la información entregada por los casos, se definieron dos (2) criterios de clasificación, que permiten identificar los aspectos relevantes en los cuales están siendo analizadas las IES Colombianas. Estos son: el reconocimiento de la importancia de la gestión de la PI por parte de las directivas de las IES; y la definición de políticas o modelos para la gestión. A continuación se describen los hallazgos de cada aspecto relevante.

- Reconocimiento de la importancia de la Gestión.

En cuanto a este criterio, se identificó que en la totalidad de los casos, algunos con mayor profundidad que otros, abordan o indagan sobre la importancia de realizar gestión de la PI en las IES y si las directivas reconocen dicha importancia. El nivel de profundidad se define de acuerdo al enfoque de cada trabajo, puesto que tres de ellos (los realizados entre el 2008 y el 2009) están orientados principalmente a exteriorizar y comprender el nivel de concientización e importancia que tienen las IES estudiadas sobre la Gestión de la PI; mientras que el resto de casos tienen otros enfoques, donde este tópico es importante, pero no el centro de la investigación. En la Tabla 4 se describen los enfoques de los trabajos.

**Tabla 3.** Métodos para evaluación de la gestión de la PI en IES

Metodología	Enfoque	Descripción
La metodología AIDA [20]	Cuantitativo	<p>El método se basa en la suposición de que, esquemáticamente, la explotación óptima de la PI se desarrolla en los siguientes pasos sucesivos (niveles de AIDA):</p> <p><b>A</b> Atención Conocimiento / conciencia</p> <p><b>I</b> Interés Protección</p> <p><b>D</b> Deseo Gestión</p> <p><b>A</b> Acción Explotación</p>
[10]	Cualitativo	<p>La gestión de la propiedad intelectual en universidades y centros de investigación, consta de nueve (9) componentes.</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Promoción de la inventiva</li> <li>6. Valuación de PI</li> <li>2. Selección y admón. de proyectos</li> <li>7. Licenciamiento de la tecnología propia</li> <li>3. Inteligencia tecnológica competitiva</li> <li>8. Auditoría de propiedad intelectual</li> <li>4. Adquisición licencias para investigación</li> <li>9. Vigilancia del patrimonio tecnológico</li> <li>5. Estrategia de protección</li> </ol>

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 4.** Enfoques de los casos estudiados.

Año	Autores	Enfoque
2006	Alvarado	Efectos de la educación técnica, universitaria y tecnológica en la gestión tecnológica empresarial (transferencia y aplicación de conocimiento)
2008	Vallejo & Álvarez	Importancia de la propiedad intelectual desde la importancia del enfoque en la investigación de las Universidades y la transferencia de resultados de investigaciones al sector industrial.
2008	García	Conciencia de la importancia de la propiedad intelectual
2009	Red de Propiedad Intelectual en Latinoamérica	Nivel de concientización en los instrumentos de PI
2011	González & Jaime	Panorama general sobre el estado de la Propiedad Intelectual en las Universidades Colombianas
2012	González, D.	Identificación de la Gestión de la propiedad intelectual para facilitar la transferencia tecnológica, a través de las etapas: Identificar, procesar - proteger, usar - transferir, capacitar. Propuesta de un modelo de gestión
2011 2013	González & Jaime	Nivel de patentamiento de las universidades Colombianas
2014	Morales, Sanabria, & Plata	Factores que han incidido en la transferencia de propiedad industrial universitaria al sector productivo
2016	Montoya & Villalba	Existencia de políticas y mecanismos de protección de la PI
2016	Gaviria & Londoño	Aplicación de un modelo de Gestión de PI existente al caso del ITM

Fuente: Elaboración propia

- Políticas, modelos y estructura organizacional para la gestión

Este aspecto relevante, representa para las IES un escalón superior al reconocimiento de la importancia de la gestión de la PI, puesto que contar con políticas, modelos de gestión y la estructura organizacional para hacerlo, es una evidencia de que las IES han desarrollado la conciencia sobre la importancia de gestionar su PI. En este sentido, desde el año 2009, los casos estudiados, incluyen aspectos como la existencia de políticas de PI y su conocimiento por parte del personal de la IES, la aplicación o propuesta de modelos para la gestión de PI y por último, la identificación, propuesta o evaluación de mecanismos o instrumentos para realizar la gestión. Excepto aquel trabajo que se enfoca en el patentamiento, tal como se muestra en la Tabla 5.

De los trabajos analizados, el de mayor profundidad corresponde al realizado por [8], puesto que además

de evidenciar el estado de la IES, propone un modelo de gestión, el cual se alinea con las recomendaciones propuestas por [6] para las universidades en Tailandia. Sin embargo, se evidencia un mayor nivel de gestión para la universidad colombiana, que puede ser resultado de la evolución temática de los 11 años de las publicaciones y el estado en el cual se encontraba la Universidad de acuerdo a la infraestructura con la que contaba para promover la PI.

Por otro lado, se tiene que cada trabajo se centra en aspectos específicos para la definición de la estructura para promover la PI, de los cuales no se puede identificar una correspondencia total entre los trabajos, pero si aspectos importantes, tales como la existencia de políticas marco en PI, la acciones para promover la inventiva, los procesos para la protección y la transferencia tecnológica. Esto se debe al enfoque de cada trabajo y los referentes teóricos que se consideraron para el desarrollo de cada estudio.



## CONCLUSIONES.

El estudio de la gestión de la PI es una herramienta para el entendimiento del papel de la PI el marco de acción de las IES como generadoras de conocimiento, su participación activa en los sistemas de innovación de los países y su inminente transformación en ambos aspectos. Esto se refleja en los enfoques de los estudios que tratan esta temática.

Como se evidencia para el caso colombiano, los estudios de hace más de ocho (8) años se enfocaban en identificar la importancia que tiene la gestión de la PI, y cómo las IES van tomando conciencia de ello. Este aspecto aún es relevante a la fecha, pero ya no es el eje central de las investigaciones, las cuales se centran en la identificación de modelos de gestión o mecanismos, que puedan garantizar mejores resultados en cuanto

a protección y explotación de la PI, y al mismo tiempo evidenciar el estado o el nivel de la gestión de la PI, el cual se encuentra por debajo de las IES de otros países como Estados Unidos, pero sin diferencias significativas o superior a las IES en algunos países de Latinoamérica.

Es por ello, que la realización de estudios en torno a la temática sigue siendo pertinente, siempre y cuando las investigaciones se orienten a profundizar en el que hacer de las IES y permitan generar propuestas de mejora (modelos o instrumentos para la gestión), que se adapten a las condiciones de las IES colombianas. Lo anterior implica nuevas propuestas metodológicas y la validación a través de casos aplicados y que se consideren los hallazgos previos y las directrices globales (como las emitidas por la OMPI) y las nacionales (las emitidas por la SIC).

**Tabla 5.** Trabajos enfocados en Políticas, modelos de gestión e infraestructura para la gestión de la PI

Año	Autores	Modelos de Gestión	Políticas	Estructura para promover la PI
2008	Vallejo & Álvarez			
2008	García			
2009	Red de Propiedad Intelectual en Latinoamérica		Miden el nivel conocimiento	Miden el nivel Gestión (criterios de la metodología AIDA)
2011	González & Jaime		Miden el nivel conocimiento	Miden el nivel Gestión (criterios de la metodología AIDA)
2012	González, D.	Propone	Se enfocan en la existencia de Políticas de investigación	Se identifican aspectos como: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Capacitación</li> <li>• Monitoreo de Creaciones</li> <li>• Incentivos para los investigadores</li> <li>• Tramites de protección</li> <li>• Creación de la Vicerrectoría de Investigación y Extensión</li> <li>• Programa de apoyo a solicitudes de registro de PI</li> </ul>
2011 2013	González & Jaime			
2014	Morales, Sanabria, & Plata		Se nombra la existencia de reglamentos de PI	Se nombran las capacidades de las Universidades: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Motivación para patentar</li> <li>• Aprendizaje de procesos en torno a la transferencia</li> <li>• Relación activa con el entorno</li> <li>• Base financiera</li> <li>• Unidades de Transferencia</li> </ul>

Año	Autores	Modelos de Gestión	Políticas	Estructura para promover la PI
2016	Montoya & Villalba		Se mide la Existencia y nivel de conocimiento	Se identifican aspectos como: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Instrumentos de gestión: Vigilancia, confidencialidad, contratos, entre otros</li> </ul>
2016	Gaviria & Londoño	Evalúa modelos y aplica uno específico al Caso (Aplican el modelo de Luna & Solleiro (2007))	Evalúa la Existencia y nivel de conocimiento	Se identifican aspectos como: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Promoción a la inventiva</li> <li>• Selección y Administración de Proyecto</li> <li>• Inteligencia Tecnológica Competitiva</li> <li>• Adquisición de Licencias para la Investigación</li> <li>• Estrategias de Protección</li> <li>• Valoración de la Propiedad Intelectual</li> <li>• Licenciamiento de la Tecnología Propia</li> <li>• Auditoría de Propiedad Intelectual</li> <li>• Vigilancia del Patrimonio Tecnológico</li> </ul>

**Nota:** los cuadros resaltados con gris, representa que no contaban con la información requerida

Fuente: Elaboración propia

## REFERENCIAS

- [1] C. Atehortúa y E. Yepes, «Gestión Estratégica de Propiedad Intelectual para la inserción en redes de la economía del conocimiento,» de *Guía estratégica de Propiedad Intelectual Universidad Empresa*, Medellín, Vallejo Editores, 2014, pp. 29-47.
- [2] J. Payumo, P. Arasu, A. Fauzi, I. Siregar y D. Noviana, «An entrepreneurial, research-based university model focused on intellectual property management for economic development in emerging economies: The case of Bogor Agricultural University, Indonesia,» *World Patent Information*, vol. 36, p. 22e31, 2014.
- [3] C. M. Mejía, *La Gestión Universitaria de la Propiedad Intelectual en Colombia*, Bogotá: Bonaventuriana, 2015.
- [4] G. A. Garcia, «La propiedad intelectual en las economías universitarias,» *Revista FACULTAD DE DERECHO Y CIENCIAS POLÍTICAS*, vol. 38, nº 108, pp. 53 -72, 2008.
- [5] D. González y A. Jaime, «El Patentamiento Universitario en Colombia,» *Journal of Technology Management & Innovation*, vol. 8 , nº Special Issue AL-TEC, pp. 233-245, 2013.
- [6] N. Cheeptham y P. Chantawannakul, «Intellectual property management and awareness at the university level in the biotechnology era: a Thai perspective,» *World Patent Information*, vol. 23, pp. 373-389, 2001.
- [7] Universidad Industrial de Santander, «PILA Network: La Red de Propiedad Intelectual e Industrial en Latinoamérica recuento de 3 años de colaboración.,» 2011. [En línea]. Available: [http://pila-network.org/sites/default/files/Version\\_Pdf\\_del\\_Libro.pdf](http://pila-network.org/sites/default/files/Version_Pdf_del_Libro.pdf). [Último acceso: 14 Enero 2017].
- [8] D. González, «La Gestión de la Propiedad Intelectual en las Universidades Colombianas: El caso de la Universidad Industrial de Santander,» Tesis de Grado - Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 2012.
- [9] R. Welsh, L. Glenna, W. Lacy y D. Biscotti, «Close enough but not too far: Assessing the effects of university–industry research relationships and the rise of academic capitalism,» *Research Policy*, nº 37, p. 1854–1864, 2008.
- [10] K. Luna y J. Solleiro, «La gestión de la propiedad intelectual en Centros de Investigación Mexicanos: El caso del Instituto Mexicano del Petróleo,» *Journal of Technology Manag e Innovation*, vol. 2, nº 2, pp. 157- 169, 2007.
- [11] Red PILA, «<http://pila-network.org/>,» 2017. [En línea]. Available: <http://pila-network.org/presentaci%C3%B3n>. [Último acceso: 16 febrero 2017].
- [12] Red PILA, «<http://pila-network.org/publicaciones>,» 2017b. [En línea]. Available: <http://pila-network.org/publicaciones>. [Último acceso: 30 Enero 2017].
- [13] G. Sabino y M. Ayuso, «La propiedad intelectual en las universidades brasileñas: Universidad Federal

- de Goias y Universidad de Brasilia,» *Biblios*, nº 47, pp. 82-103, 2012.
- [14] K. Pineda, M. E. Morales y M. C. Ortiz, «Modelos y mecanismos de interacción universidad-empresa-Estado: retos para las universidades colombianas,» *Equidad & Desarrollo*, nº 15, pp. 41-67, 2011.
- [15] L. Solano, «La Propiedad Intelectual en las Universidades: Nuevos centros de innovación, emprendimiento y transferencia de tecnología; titularidad de derechos y legislación.,» Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, 2012.
- [16] Ruta N; Cámara de Comercio de Medellín para Antioquia; Coroporación Tecnova UEE, Guía Estratégica de Propiedad Intelectual. Universidad Empresa, Medellín : Vallejo Editores, 2014.
- [17] L. A. Briceño y E. Morales, «Desafíos de la política pública colombiana frente a la transferencia de resultados de investigación universitaria,» *Revista Virtual Via Inveniendi et Iudicandi*, vol. 10, nº 1, pp. 43-86, 2015.
- [18] F. Alvarado-Benavides, « Algunos efectos de la gestión tecnológica en la producción industrial y el papel de la educación para su apropiación en Colombia.,» *Ingeniería Investigación Y Desarrollo*, vol. 3, nº 2, pp. 23-29, 2006
- [19] F. Vallejo y D. Álvarez, «Importancia de la propiedad intelectual en la Universidad Católica de Colombia,» *Studiositas.*, vol. 3, nº 1, pp. 21-27, 2008.
- [20] Red PILA, «Análisis del nivel de concientización y uso de la PI en las IES: Necesidades Formativas. Colombia,» 2009.
- [21] D. González y A. Jaime, «El estado de La Propiedad Intelectual en las Universidades Colombianas,» *UIS Ingenierías*, vol. 10, nº 2, pp. 101-112, 2011.
- [22] M. E. Morales, R. Sanabria y P. A. Plata, «Determinantes de la transferencia de propiedad industrial al sector productivo en universidades públicas colombianas,» *CUADERNOS DE ADMINISTRACIÓN*, 2014.
- [23] F. Montoya y M. Villalba, «Diagnóstico del Sistema de Gestión de la Propiedad Intelectual Universitaria: Caso Universidad de San Buenaventura,» de *5º Congreso Internacional de Gestión Tecnológica y de la Innovación - COGESTEC*, Bucaramanga, 2016.
- [24] L. Gaviría y J. D. Londoño, «Importancia de un Modelo de Gestión de Propiedad Intelectual en una Institución De Educación Superior: Caso Instituto Tecnológico Metropolitano,» de *5º Congreso Internacional de Gestión Tecnológica y de la Innovación - COGESTEC*, Bucaramanga, 2016.

## **CRITERIOS GENERALES PARA LA PRESENTACIÓN DE ARTÍCULOS REVISTA INGENIERÍA, INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA, SECCIONAL SOGAMOSO**

La Revista Ingeniería, Investigación y Desarrollo I2+D, es una publicación que se edita semestralmente y maneja una convocatoria permanente, financiada por la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Seccional Sogamoso -Boyacá, Colombia, creada en el año 2005. Tiene como misión publicar y divulgar artículos científicos, productos de una investigación, en todos los campos de la ingeniería y tecnología: Industrial, electrónica y comunicaciones, ciencias de la tierra, sistemas y computación, ingeniería de los materiales, ingeniería electromecánica, Ambiental, transporte y vías, y otras afines.

Ingeniería, Investigación y Desarrollo invita a toda la comunidad académica e investigativa de instituciones públicas y privadas, regionales, nacionales e internacionales, tales como investigadores, grupos y semilleros de investigación, docentes, estudiantes, directivos de ingeniería y demás interesados en temáticas relacionadas con las diferentes áreas de la Ingeniería, para que presenten sus contribuciones y trabajos inéditos, en español o inglés. Podrán publicarse artículos originales, de investigación y/o innovación tecnológica.

Los artículos sometidos serán evaluados previamente por el comité editorial, y por pares evaluadores externos o internos antes de su publicación, que se reservan el derecho de decidir sobre su publicación. Los pares revisores emitirán un concepto sobre el contenido del artículo desde la calidad y el rigor científico, en el formato de evaluación establecido por la revista. Las observaciones y sugerencias manifestadas por los evaluadores serán enviadas a los autores para que realicen los respectivos ajustes, con el fin de decidir si el artículo cumple con las condiciones para ser publicable o no. La Revista siempre utilizará el sistema de "par doble ciego" En este proceso se da un espacio de correspondencia entre el editor y los autores para los ajustes necesarios. Los tiempos de publicación de un artículo dependerán en gran medida de la oportuna respuesta que los autores den a cada requerimiento del editor, los trabajos enviados a "Ingeniería, Investigación y Desarrollo" no podrán ser sometidos simultáneamente a evaluación por otro medio de publicación. La aceptación de un artículo por parte del comité editorial, no implica que vaya a ser publicado, el contenido de los trabajos es responsabilidad exclusiva de sus autores. No se devolverán los originales de los trabajos.

Todos los artículos deben matricularse en la plataforma OJS, accesible desde el sitio web [www.uptc.edu.co/enlaces/ringinedesa](http://www.uptc.edu.co/enlaces/ringinedesa), junto con la carta de presentación, firmada por los autores, para realizar el proceso de matrícula del manuscrito el autor debe compilar previamente un formulario de registro, escogiendo la opción de autor, donde le será asignado un usuario y contraseña para que pueda realizar el envío del documento. Por medio de este mismo enlace podrá ser consultada y descargada la plantilla de presentación de artículos y el modelo de la carta de cesión de derechos de autores estipulado por la revista.

### **Extensión del artículo:**

Los artículos se presentan en hojas tamaño carta con márgenes superior: 3 cm, derecho: 2 cm, izquierdo: 3 cm e inferior: 2 cm, a espacio sencillo, doble columna, letra calibri y un contenido de máximo 10 páginas.

### **Estructura:**

**Secciones:** título, resumen, palabras clave, introducción, materiales y métodos, resultados, discusión, conclusiones, agradecimiento (si procede) y referencias. Para las tres primeras secciones se requiere, además, su traducción al inglés (title, abstract and keywords), que se colocará inmediatamente debajo de la versión en español.

**Título:** se sugiere no exceder de 15 palabras.

**Resumen:** máximo 250 palabras, el propósito del trabajo, los métodos empleados, resultados más significativos y conclusiones más importantes. Se redactará en un solo párrafo, en tiempo presente y modo impersonal. No incluirá abreviaturas, siglas, citas bibliográficas ni referencias a tablas o figuras.

**Palabras clave:** en orden alfabético, 4 o 5 términos relacionados con el contenido del artículo.

**Introducción:** tratará el tema específico del trabajo e informará sobre el propósito, importancia, aplicación práctica de la investigación y conocimiento actual del tema.

**Materiales y métodos:** proveerá suficiente información para que el experimento pueda repetirse bajo las mismas condiciones. Cuando los métodos, técnicas y procedimientos empleados sean muy conocidos, bastará con mencionarlos. Si se modifica un método de otro investigador deberá aportarse la cita y explicar detalladamente la modificación; pero si el método es nuevo, se describirá en detalle. Cuando se trate de investigaciones de campo, deberán aparecer las características del área de estudio y del muestreo.

**Resultados:** se expondrán mediante texto, figuras, tablas, cuidando no repetir una misma información en más de una forma, en esta sección se deben presentar los resultados hallados en la investigación.

**Discusión:** se explicarán los datos experimentales y se compararán con los resultados obtenidos por otros investigadores.

Las secciones de Resultados y Discusión podrán presentarse de forma independiente o combinada, según preferencia del autor.

**Agradecimientos:** será el lugar para reconocer la ayuda de personas e instituciones que aportaron significativamente al desarrollo de la investigación.

**Referencias:** Las referencias bibliográficas y citas, deben atender al estilo IEEE, se registrarán solamente los trabajos citados en el texto, que deberán tener un nivel adecuado de actualización, las referencias deben hacerse por orden de aparición en el artículo. Téngase en cuenta que la actualidad de las referencias es un elemento de gran peso en la evaluación de la calidad de los artículos, se debe adicionar el DOI a las referencias bibliográficas que lo tengan.

Para obtener la plantilla de presentación de artículos, por favor diríjase al correo: [revistaid@uptc.edu.co](mailto:revistaid@uptc.edu.co) o al enlace: [www.uptc.edu.co/enlaces/ringinvedesa](http://www.uptc.edu.co/enlaces/ringinvedesa), a la sección Acerca de.

## ÍNDICE DE AUTORES

Vol. 15 N° 1 (Enero-Junio 2015) - Vol. 18 N° 1 (Julio-Diciembre 2018)

Revista Ingeniería Investigación y Desarrollo I<sup>2</sup>+D.

### A

#### **ABRIL GONZÁLEZ, NEBARDO ARTURO**

Evaluación de amenazas por movimientos en masa causados en Jericó Boyacá, durante el periodo invernal de 2011. Vol. 16 N° 1 (Enero-Junio 2016); pp. 6-14.

Modelamiento físico a escala de pilotes individuales, de cabeza libre, sometidos a carga lateral en suelos cohesivos. Vol. 17 N° 2 (Julio-Diciembre 2017); pp. 73-82.

#### **ADARME JAIMES, WILSON**

Modelo de Coordinación de Inventarios Colaborativos Soportado en un Enfoque Sociotécnico de Sistemas. Vol.18 N° 1 (Enero-Junio 2018); pp. 64-71.

#### **AGUIRRE CÁRDENAS, ANGIE DANIELA**

Influencia del fenómeno de oscilación cuasi-bienal en las afluencias del sistema sur de abastecimiento de Bogotá. Vol. 18 N° 1 (Enero-Junio 2018); pp. 17-25.

#### **ALMANZA VELASCO, SEBASTIÁN**

Influencia del fenómeno de oscilación cuasi-bienal en las afluencias del sistema sur de abastecimiento de Bogotá. Vol. 18 N° 1 (Enero-Junio 2018); pp. 17-25.

#### **ALONSO GONZÁLEZ, JOSÉ FRANCISCO**

Diseño de un banco para la determinación práctica del coeficiente de válvulas norma VDI/VDE 2173. Vol. 18 N° 1 (Enero-Junio 2018); pp. 6-16.

#### **AMAYA REYES, EDWIN GILBERTO**

Evaluación de amenazas por movimientos en masa causados en Jericó Boyacá, durante el periodo invernal de 2011. Vol. 16 N° 1 (Enero-Junio 2016); pp. 6-14.

#### **ANGARITA CEDIEL, FRANCISCO**

Amplificador operacional de transconductancia con alto rango modo común y bajo consumo de potencia. Vol. 16 N° 2 (Julio-Diciembre 2015); pp. 74-79.

#### **ANGARITA MALAVER, EDISON FERNEY**

El amplificador de potencia Doherty con etapa de pre-amplificación. Vol. 15 N° 2 (Julio-Diciembre 2015); pp. 42-46.

Amplificadores de potencia para aplicaciones de microondas basados en dispositivos GaN. Vol. 16 N° 1 (Enero-Junio 2016); pp. 22-26.

#### **ARAÚJO SEGURA, RICARDO**

Diseño de un banco para la determinación práctica del coeficiente de válvulas norma VDI/VDE 2173. . Vol. 18 N° 1 (Enero-Junio 2018); pp. 5-15.

#### **ARBOLEDA ZÚÑIGA, JAIRO,**

Modelo matemático para administrar el inventario del banco de sangre de un centro hospitalario. Vol.18 N°2 (Julio-Diciembre 2018); pp. 5-14

#### **ARGUMEDO, CARLOS DORIA**

Caracterización química de material particulado Pm10 en la atmósfera de Rioacha- La Guajira Colombia. Vol. 17 N° 1 (Enero-Junio 2017); pp. 5-16.

#### **ARIAS HERNÁNDEZ, JESÚS DANIEL**

Desarrollo de aplicaciones en python para el aprendizaje de física computacional. Vol. 16 N° 1 (Enero-Junio 2016); pp. 74-84.

## **ARRIETA FUENTES, ÁLVARO JAVIER**

Dispersión de material particulado (PM10), con interrelación de factores meteorológicos y topográficos. Vol. 16 N° 2 (Julio-Diciembre 2015); pp. 39-50.

## **B**

### **BARRIOS URUEÑA, EDGAR**

Control multivariable lineal con desacoples en un intercambiador de calor. Vol. 1 N° (Enero-Junio 2017); pp. 17-25.

### **BARRIOS LEÓN, MARIANNA**

Modelo de Coordinación de Inventarios Colaborativos Soportado en un Enfoque Sociotécnico de Sistemas. Vol. 18 N° 1 (Enero-Junio 2018); pp. 64-71.

### **BECERRA, YEIMY LISETH**

Propuesta metodológica para la definición de estrategias de mejoramiento en logística de pymes. Vol. 15 N° 1 (Enero-Junio 2015); pp. 48-57.

### **BOCANEGRA GARCÍA, JOSÉ JOAQUÍN**

El uso de los videojuegos como herramienta didáctica para mejorar la enseñanza-aprendizaje: una revisión del estado del arte. Vol. 17 N° 2 (Julio-Diciembre 2017); pp. 36-46.

Uso de herramientas tecnológicas en la producción piscícola: una revisión sistemática de literatura. Vol. 17 N° 2 (Julio-Diciembre 2017); pp. 47-56.

## **C**

### **CALDERÓN MORENO, ROGER**

Mapeo de objetos a través de un motor de datos NOSQL, caso de estudio: framework para desarrollo de aplicaciones web. Vol. 16 N° 1 (Enero-Junio 2016); pp. 63-73.

### **CAMPO ESCUDERO, LUIS**

Diseño de un banco para la determinación práctica del coeficiente de válvulas norma VDI/VDE 2173. . Vol. 18 N° 1 (Enero-Junio 2018); pp. 6-16.

### **CÁRDENAS, MARISOL VALENCIA**

Inventory model using bayesian dynamic linear model for demand forecasting. Vol. 15 N° 1 (Enero-Junio 2015); pp. 39-47.

### **CÁRDENAS AGUIRRE, DIANA MARÍA**

¿Qué ha pasado con la aplicación del estudio de tiempos y movimientos en las últimas dos décadas?: revisión de la literatura. Vol. 16 N° 2 (Julio-Diciembre 2015); pp. 12-27.

### **CÁRDENAS, LEYDI JULIETA**

Sistema de posicionamiento de una antorcha utilizada en la aplicación de recubrimientos por proyección térmica. Vol. 16 N° 2 (Julio-Diciembre 2015); pp. 51-61.

### **CARREÑO SAYAGO, URIEL FERNANDO**

Tratamientos de aguas industriales con metales pesados a través de zeolitas y sistemas de biorremediación. Revisión del estado de la cuestión. Vol. 15 N° 1 (Enero-Junio 2015); pp. 70-78.

### **CARVAJAL FERNÁNDEZ, LINA CONSUELO**

Estandarización del proceso de fundición para arenas con resinas autofraguantes en la industria militar fábrica Santa Bárbara. Vol. 15 N° 1 (Enero-Junio 2015); pp. 13-19.

### **CASTELLANOS CASAS, JUAN SEBASTIÁN**

Diseño de una óptica de red pasiva bidireccional con particionamiento espectral de una fuente de banda ancha, Vol. 18 N° 1 (Enero-Junio 2018); pp. 26-33.

**CASTRO GALEANO, JUAN CARLOS**

Prueba de rigidez dieléctrica a elementos de protección para trabajos con tensión TCT. Vol. 17 N° 2 (Julio-Diciembre 2017); pp. 83-92.

**CARDENAS GAMBOA, CHRISTIAN CAMILO**

Prototipo de monitoreo y alarma para la detección de heladas blancas en sectores rurales de Sogamoso. Vol. 18 N° 1 (Enero-Junio 2018); pp. 57-63.

**CORMANE TAMAYO, FERNANDO MIGUEL**

Estudio geoespeleológico de la caverna del cerro Ecce Homo en el municipio de Chimichagua, Cesar. Vol. 15 N° 2 (Julio-Diciembre 2015); pp. 6-14.

**CORREA MORALES, JUAN CARLOS**

Inventory model using bayesian dynamic linear model for demand forecasting. Vol. 15 N° 1 (Enero-Junio 2015); pp. 39-47.

**CORREDOR LÓPEZ, LUISA FERNANDA**

Análisis del comportamiento del impuesto a las ventas con la implementación del impuesto nacional al consumo. Vol. 15 N° 1 (Enero-Junio 2015); pp. 7-12.

**CRUZ MEDINA, FANNY LILIANA**

Sistema de gestión ISO 9001-2015: técnicas y herramientas de ingeniería de calidad para su implementación. Vol. 17 N° 1 (Enero-Junio 2017); pp. 59-69.

**CUEVAS CARRERO, WILLIAM ALEXANDER**

El amplificador de potencia Doherty con etapa de pre-amplificación. Vol. 15 N° 2 (Julio-Diciembre 2015); pp. 42-46. Amplificadores de potencia para aplicaciones de microondas basados en dispositivos GaN. Vol. 16 N° 1 (Enero-Junio 2016); pp. 22-26.

**D**

**DÍAZ SERNA, FRANCISCO JAVIER**

Inventory model using bayesian dynamic linear model for demand forecasting. Vol. 15 N° 1 (Enero-Junio 2015); pp. 39-47.

**DÍAZ LAGOS, MERCEDES**

Contaminación por metales pesados: implicaciones en salud, ambiente y seguridad alimentaria. Vol. 16 N° 2 (Julio-Diciembre 2016); pp. 66-77. Evolución de fases magnéticas presentes en arcillas de Boyacá sometidas a altas temperaturas. Vol. 16 N° 2 (Julio-Diciembre 2015); pp. 84-93.

**DUARTE PINILLA, NATALIA ANDREA**

Justificación de una propuesta regulatoria para radiodifusión sonora y transmóviles en las fronteras colombianas. Vol. 15 N° 2 (Julio-Diciembre 2015); pp. 31-41.

**E**

**ESPITIA FLÓREZ, HELBERTH YESID**

Prototipo de silla de ruedas comandada por voz empleando HMM en un ambiente controlado. Vol. 16 N° 1 (Enero-Junio 2016); pp. 26-38.

**F**

**FAGUNDO CASTILLO, JUAN REYNERIO**

Caracterización química de material particulado Pm10 en la atmósfera de Rioacha- La Guajira Colombia. Vol. 17 N° 1 (Enero-Junio 2017); pp. 5-16.

**FONSECA PERALTA, HÉCTOR ANTONIO**

Evaluación de amenazas por movimientos en masa causados en Jericó Boyacá, durante el periodo invernal de 2011. Vol. 16 N° 1 (Enero-Junio 2016); pp. 6-14.



## **FUENTES MOJICA, JUAN DAVID**

Sistema de posicionamiento de una antorcha utilizada en la aplicación de recubrimientos por proyección térmica. Vol. 16 N° 2 (Julio-Diciembre 2015); pp. 51-61.

## **G**

### **GALVIS BOTÍA, DIANA ROCÍO**

Análisis de los factores que inciden en la desestabilización de las columnas de la catedral de sal en Zipaquirá, Cundinamarca. Vol. 15 N° 1 (Julio-Diciembre 2015); pp. 20-38.

### **GALLO MARTÍNEZ, LAURA MARELY**

Modelación matemática de techos verdes en Colombia: selección de un modelo mediante la metodología AHP. Vol.18 N°2 (Julio-Diciembre 2018); pp. 35-46.

### **GÓMEZ NEITA, JUAN SEBASTIÁN**

Aportes a la determinación de paleoambientes, carbones del Sinclinal Checua-Lenguazaque. Colombia. Vol. 16 N° 2 (Julio-Diciembre 2015); pp. 28-38.

### **GÓMEZ ORTIZ, HÉCTOR IVÁN**

Amplificador operacional de transconductancia con alto rango modo común y bajo consumo de potencia. Vol. 16 N° 2 (Julio-Diciembre 2015); pp. 74-79.

### **GONZÁLEZ, EDGAR E.**

Contaminación por metales pesados: implicaciones en salud, ambiente y seguridad alimentaria. Vol. 16 N° 2 (Julio-Diciembre 2015); pp. 66-77.

### **GRANDAS RINCÓN, ISNARDO ANTONIO**

Caracterización morfológica y estructural del cascarón cerámico desecho del proceso de microfundición en fasab Sogamoso. Vol. 16 N° 1 (Enero-Junio 2016); pp. 15-21.

## **H**

### **HACAR, FERNANDO**

Túneles con paramentos rugosos y con cavidades. Vol. 15 N° 1 (Julio-Diciembre 2015); pp. 58-69.

### **HEARD WADE, CHRISTOPHER L.**

Desarrollo de una aplicación para el cálculo de las propiedades de la mezcla amoniaco-agua. Vol. 17 N° 2 (Julio-Diciembre 2017); pp. 58-72.

### **HIGUERA MARTÍNEZ, OSCAR IVÁN**

Controlador robusto LMI para un helicóptero de dos grados de libertad. Vol. 15 N° 2 (Julio-Diciembre 2015); pp. 47-57. Prototipo de silla de ruedas comandada por voz empleando HMM en un ambiente controlado. Vol. 16 N° 1 (Enero-Junio 2016); pp. 26-38. Deserción estudiantil en Colombia y los programas de ingeniería de la UPTC, seccional Sogamoso. Vol. 17 N° 1 (Enero-Junio 2017); pp. 69-75.

## **I**

### **IVANOVA, YULIA**

Influencia del fenómeno de oscilación cuasi-bienal en las afluencias del sistema sur de abastecimiento de Bogotá. Vol. 18 N° 1 (Enero-Junio 2018); pp. 17-25.

## **J**

### **JEREZ JAIMES, JAVIER HERNANDO**

Nuevo registro de *Pseudocidaris* spp. (Echinoidea: Hemicidaridae) del cretácico inferior (Valanginiano-Hauteriviano) de Zapatoca (Santander, Colombia). Vol. 15 N° 2 (Julio-Diciembre 2015); pp. 25-30.

**JIMÉNEZ LÓPEZ, ANDRÉS FERNANDO**

Desarrollo de aplicaciones en python para el aprendizaje de física computacional. Vol. 16 N° 1 (Enero-Junio 2016); pp. 74-84.

**JIMÉNEZ SÁNCHEZ, JUAN DAVID**

Pulsos y probabilidad de ocurrencia de inundación de la laguna de Fúquene. Vol. 18 N° 1 (Enero-Junio 2018); pp. 46 -56.

**JIMÉNEZ TOVAR, GINNA ALEJANDRA**

Lixiviación de cobre contenido en tarjetas de computador PCB para la extracción de metales preciosos. Vol.18 N°2 (Julio-Diciembre 2018); pp. 15-21

**JOJOA MUÑOZ, JAIME WILLIAM**

Análisis de los factores que inciden en la desestabilización de las columnas de la catedral de sal en Zipaquirá, Cundinamarca. Vol. 15 N° 1 (Julio-Diciembre 2015); pp. 20-38.

**JÖNSSON, JIMMY**

Túneles con paramentos rugosos y con cavidades. Vol. 15 N° 1 (Julio-Diciembre 2015); pp. 58-69.

**L**

**LARA GONZÁLEZ, LUIS ÁNGEL**

Caracterización morfológica y estructural del cascarón cerámico desecho del proceso de microfundición en fasab Sogamoso. Vol. 16 N° 1 (Enero-Junio 2016); pp. 15-21.

**LASCARRO NAVARRO, FRANK DAVID**

Estudio geoespeleológico de la caverna del cerro Ecce Homo en el municipio de Chimichagua, Cesar. Vol. 15 N° 2 (Julio-Diciembre 2015); pp. 6-14

**LEDEZMA RÍOS, JAVIER ANDRÉS**

Tecnología aplicada en el funcionamiento y la detección de minas antipersonales: estado del arte. Vol. 17 N° 2 (Julio-Diciembre 2017); pp. 23-35.

**LÓPEZ CARRASQUILLA, MAYRA DAYANA**

Aportes a la determinación de paleoambientes, carbones del Sinclinal Checua-Lenguazaque. Colombia. Vol. 16 N° 2 (Julio-Diciembre 2015); pp. 28-38.

**LÓPEZ SÁNCHEZ, WILSON RICARDO**

Reconfigurable architecture based on fiber bragg gratings for convergent optical indoor networks. Vol. 16 N° 1 (Enero - Junio 2016); pp. 55-62.

**LÓPEZ DÍAZ, ANDREA DEL PILAR**

Sistema de gestión ISO 9001-2015: técnicas y herramientas de ingeniería de calidad para su implementación. Vol. 17 N° 1 (Enero-Junio 2017); pp. 59-69.

**LL**

**LLANO RUÍZ, HUMBERTO**

El uso de los videojuegos como herramienta didáctica para mejorar la enseñanza-aprendizaje: una revisión del estado del arte. Vol. 17 N° 2 (Julio-Diciembre 2017); pp. 36-46.

**M**

**MALPICA LOPÉZ, MAGALLY JHOANNA**

El uso de los videojuegos como herramienta didáctica para mejorar la enseñanza-aprendizaje: una revisión del estado del arte. Vol. 17 N° 2 (Julio-Diciembre 2017); pp. 36-46.

### **MANCIPE, NÉSTOR ALONSO**

Modelación matemática de techos verdes en Colombia: selección de un modelo mediante la metodología AHP. Vol.18 N°2 (Julio-Diciembre 2018); pp. 35-46.

### **MANOSALVA SÁNCHEZ, SANDRA ROCÍO**

Aportes a la determinación de paleoambientes, carbones del Sinclinal Checua-Lenguazaque. Colombia. Vol. 16 N° 2 (Julio-Diciembre 2015); pp. 28-38.

### **MARTÍNEZ FLÓREZ, GUILLERMO**

Comparación de estimadores no paramétricos frente a los paramétricos para la función de confiabilidad. Vol. 15 N° 2 (Julio-Diciembre 2015); pp. 15-24.

### **MARTÍNEZ BAQUERO, JAVIER EDUARDO**

Diseño de un controlador de intensidad luminosa para una máquina de insolación. Vol. 17 N° 1 (Enero-Junio 2017); pp. 26-36.

### **MARTÍNEZ OVALLE, SEGUNDO AGUSTÍN**

Evolución de fases magnéticas presentes en arcillas de Boyacá sometidas a altas temperaturas. Vol. 16 N° 2 (Julio-Diciembre 2015); pp.84-93.

### **MARTÍNEZ CORA, PATRICIA**

Brechas emergentes en el uso de Internet: un frente de acción a la zaga en Colombia. Vol. 18 N° 1 (Enero-Junio 2018); pp. 34-45.

### **MÉNDEZ MEDINA, DIEGO**

Prototipo de silla de ruedas comandada por voz empleando HMM en un ambiente controlado. Vol. 16 N° 2 (Enero-Junio 2016); pp. 26-38.

### **MONTOYA, FRANCISCO JAVIER**

Una revisión sistemática de literatura sobre la gestión de la propiedad intelectual en instituciones de educación superior. Vol.18 N°2 (Julio-Diciembre 2018); pp. 47-59.

### **MORENO RUBIO, JORGE JULIÁN**

El amplificador de potencia Doherty con etapa de pre-amplificación. Vol. 15 N° 2 (Julio-Diciembre 2015); pp. 42-46.  
Amplificadores de potencia para aplicaciones de microondas basados en dispositivos GaN. Vol. 16 N° 1 (Enero-Junio 2016); pp. 22-26.

### **MORENO, SERGIO**

Análisis y comparativo de los amplificadores ópticos SOA, EDFA y RAMAN. Vol.18 N°2 (Julio-Diciembre 2018); pp. 22-28.

### **MORALES SUÁREZ, LUIS E.**

Diseño de un controlador de intensidad luminosa para una máquina de insolación. Vol. 17 N° 1 (Enero-Junio 2017); pp. 26-36.

### **MORENO TÉLLEZ, CARLOS MAURICIO**

Sistema de posicionamiento de una antorcha utilizada en la aplicación de recubrimientos por proyección térmica. Vol. 16 N° 2 (Julio-Diciembre 2015); pp. 51-61.

## **N**

### **NARANJO MERCHÁN, WILSON ENARIO**

Aportes a la determinación de paleoambientes, carbones del Sinclinal Checua-Lenguazaque. Colombia. Vol. 16 N° 2 (Julio-Diciembre 2015); pp. 28-38.

### **NEIRA TRIANA, CARLOS ANDRÉS**

Amplificador operacional de transconductancia con alto rango modo común y bajo consumo de potencia. Vol. 16 N° 2 (Julio-Diciembre 2015); pp. 74-79.

## Ñ

### **ÑUSTES, WISTON**

Colombia: Territorio de inversión en fuentes no convencionales de energía renovable para la generación eléctrica. Vol. 17 N° 1 (Enero-Junio 2017); pp. 37-48.

## O

### **OCAMPO VÉLEZ, PABLO CÉSAR**

Cadena de abastecimiento verde en empresa textil colombiana. Vol. 16 N° 1 (Enero-Junio 2016); pp. 85-92.

### **ORTIZ CARRERA, MARCO FIDEL**

El uso de los videojuegos como herramienta didáctica para mejorar la enseñanza-aprendizaje: una revisión del estado del arte. Vol. 17 N° 2 (Julio-Diciembre 2017); pp. 36-46.

### **OSMA DUARTE, ÁLVARO SERGIO**

Nuevo registro de *Pseudocidaris* spp. (Echinoidea: Hemiciidaridae) del cretácico inferior (Valanginiano-Hauteriviano) de Zapatoaca (Santander, Colombia). Vol. 15 N° 2 (Julio-Diciembre 2015); pp. 25-30

### **OVALLE CASTIBLANCO, ALEX MAURICIO**

¿Qué ha pasado con la aplicación del estudio de tiempos y movimientos en las últimas dos décadas?: revisión de la literatura. Vol.16 N° 2 (Julio-Diciembre 2015); pp. 12-27.

## P

### **PALACIO LEÓN, ÓSCAR**

Modelo de Coordinación de Inventarios Colaborativos Soportado en un Enfoque Sociotécnico de Sistemas. Vol.18 N° 1 (Enero-Junio 2018); pp. 64-71.

### **PARRADO S., ELÍAS**

Diseño de un controlador de intensidad luminosa para una máquina de insolación. Vol. 17 N° 1 (Enero-Junio 2017); pp. 26-36.

### **PAREDES ROA, RICARDO ALFONSO**

Caracterización morfológica y estructural del cascarón cerámico desecho del proceso de microfundición en fasab Soga-moso. Vol. 16 N° 1 (Enero-Junio 2016); pp. 15-21.

### **PARRA PINILLA, MARIO**

Lixiviación de cobre contenido en tarjetas de computador PCB para la extracción de metales preciosos. Vol.18 N°2 (Julio-Diciembre 2018); pp. 15-21

### **PATIÑO DUQUE, HERNÁN DARÍO**

Análisis exergético de una planta de cogeneración operando bajo ciclo combinado. Vol. 17 N° 1 (Enero-Junio 2017); pp. 49-58.

### **PAZ PENAGOS, HERNÁN**

Justificación de una propuesta regulatoria para radiodifusión sonora y transmóviles en las fronteras colombianas. Vol. 15 N° 2 (Julio-Diciembre 2015); pp. 31-41.

### **PINTO SALAMANCA, MARÍA LUISA**

Sistema de posicionamiento de una antorcha utilizada en la aplicación de recubrimientos por proyección térmica. Vol. 16 N° 2 (Julio-Diciembre 2015); pp. 51-61.

### **PINTO SALAMANCA, CARLOS EDUARDO**

Prueba de rigidez dieléctrica a elementos de protección para trabajos con tensión TCT. Vol. 17 N° 2 (Julio-Diciembre 2017); pp. 83-92.

### **PEÑARANDA, NYDIA GENITH**

Análisis de los factores que inciden en la desestabilización de las columnas de la catedral de sal en Zipaquirá, Cundinamarca. Vol. 15 N° 1 (Julio-Diciembre 2015); pp. 20-38.

### **PÉREZ ZAPATA, JAIME**

Identificación y cuantificación del potencial de energía undimotriz en la costa del departamento del Atlántico, Colombia. Vol. 17 N° 2 (Julio-Diciembre 2017); pp. 93-102.

### **PORRAS CASTRO, HERNÁN OSWALDO**

Desarrollo de aplicaciones en python para el aprendizaje de física computacional. Vol. 16 N° 1 (Enero-Junio 2016); pp. 74-84.

### **PRADA OSPINA, RICARDO PABLO**

Cadena de abastecimiento verde en empresa textil colombiana. Vol. 16 N° 1 (Enero-Junio 2016); pp. 85-92.

### **PUNTES PÉREZ, JOAN SEBASTIÁN**

Nuevo registro de Pseudocidaris spp. (Echinoidea: Hemicidaridae) del cretácico inferior (Valanginiano-Hauteriviano) de Zapatoaca (Santander, Colombia). Vol. 15 N° 2 (Julio-Diciembre 2015); pp. 25-30.

### **PUERTO, GUSTAVO**

Análisis y comparativo de los amplificadores ópticos SOA, EDFA y RAMAN. Vol.18 N°2 (Julio-Diciembre 2018); pp. 22-28.

### **PUERTO LEGUIZAMÓN, GUSTAVO**

Reconfigurable architecture based on fiber bragg gratings for convergent optical indoor networks. Vol. 16 N° 1 (Enero - Junio 2016); pp. 55-62.

Diseño de una óptica de red pasiva bidireccional con particionamiento espectral de una fuente de banda ancha, Vol. 18 N° 1 (Enero-Junio 2018); pp. 26-33.

## **Q**

### **QUEVEDO, ÁLVARO URIBE**

Audio effects on haptics perception during drilling simulation. Vol. 17 N° 2 (Julio-Diciembre 2017); pp. 6-15.

### **QUINTERO GONZÁLEZ, JULIÁN RODRIGO**

Sistemas de producción y potencial energético de la energía mareomotriz. Vol. 16 N° 1 (Enero-Junio 2016); pp. 40-47.

### **QUINTERO GONZÁLEZ, LAURA ESTEFANÍA**

Sistemas de producción y potencial energético de la energía mareomotriz. Vol. 16 N° 1 (Enero-Junio 2016); pp. 40-47.

## **R**

### **RAMÍREZ MONTOYA, JAVIER**

Comparación de estimadores no paramétricos frente a los paramétricos para la función de confiabilidad. Vol. 15 N° 2 (Julio-Diciembre 2015); pp. 15-24.

### **RESTREPO BURGOS, NORMA**

Amplificadores de potencia para aplicaciones de microondas basados en dispositivos GaN. Vol. 16 N° 1 (Enero-Junio 2016); pp. 22-26.

### **REYES, YULIETH C.**

Contaminación por metales pesados: implicaciones en salud, ambiente y seguridad alimentaria. Vol. 16 N° 2 (Julio-Diciembre 2016); pp. 66-77.

### **ROLDÁN MCKINLEY, JAVIER**

Diseño de un banco para la determinación práctica del coeficiente de válvulas norma VDI/VDE 2173. . Vol. 18 N° 1 (Enero-Junio 2018); pp. 6-16.

**RICARDO BARRERA, JAIME FREDDY**

Control multivariable lineal con desacoples en un intercambiador de calor. Vol 1 N° (Enero-Junio 2017); pp. 17-25.

**RIVERA RODRÍGUEZ, SERGIO RAÚL**

Colombia: Territorio de inversión en fuentes no convencionales de energía renovable para la generación eléctrica. Vol. 17 N° 1 (Enero-Junio 2017); pp. 37-48.

Potencial en el uso de la consulta de patentes para determinar el estado de la técnica. Análisis en microrredes con energías renovables. Vol. 17 N° 2 (Julio-Diciembre 2017); pp.16-22.

**ROA BOHÓRQUEZ, KAROL LIZETH**

Caracterización morfológica y estructural del cascarón cerámico desecho del proceso de microfundición en fasab Sogamoso. Vol. 16 N° 1 (Enero-Junio 2016); pp. 15-21.

**RODRÍGUEZ, JULIÁN LEONARDO**

Amplificadores de potencia para aplicaciones de microondas basados en dispositivos GaN. Vol. 16 N° 1 (Enero-Junio 2016); pp. 22-26.

**ROJAS MARTÍNEZ, ELÍAS ERNESTO**

Estudio geoespeleológico de la caverna del cerro Ecce Homo en el municipio de Chimichagua, Cesar. Vol. 15 N° 2 (Julio-Diciembre 2015); pp. 6-14.

**ROJAS MOLINA, LYNDY YANETH**

Uso de herramientas tecnológicas en la producción piscícola: una revisión sistemática de literatura. Vol. 17 N° 2 (Julio-Diciembre 2017); pp. 47-56.

**ROJAS PIÑA, CARLOS SEBASTIÁN**

Diseño de una óptica de red pasiva bidireccional con particionamiento espectral de una fuente de banda ancha, Vol. 18 N° 1 (Enero-Junio 2018); pp. 26-33.

**ROMERO MOLANO, CÉSAR AUGUSTO**

Monitorización web de señales industriales usando sistemas embebidos. Vol. 16 N° 1 (Enero-Junio 2016); pp. 48-54.

**RONCANCIO ORTIZ ANGIE PAOLA**

El uso de los videojuegos como herramienta didáctica para mejorar la enseñanza-aprendizaje: una revisión del estado del arte. Vol. 17 N° 2 (Julio-Diciembre 2017); pp. 36-46.

**ROSETO CORAL, BRAYAN DARÍO**

Análisis exergético de una planta de cogeneración operando bajo ciclo combinado. Vol. 17 N° 1 (Enero-Junio 2017); pp. 49-58.

**RUGE GUERRERO, ÓSCAR ORLANDO**

Evolución de fases magnéticas presentes en arcillas de Boyacá sometidas a altas temperaturas. Vol. 16 N° 2 (Julio-Diciembre 2015); pp. 84-93.

**RUÍZ CÁRDENAS, CONSUELO**

Sistema de gestión ISO 9001-2015: técnicas y herramientas de ingeniería de calidad para su implementación. Vol. 17 N° 1 (Enero-Junio 2017); pp. 59-69.

**S**

**SALAMANCA, JUAN MAURICIO**

Controlador robusto LMI para un helicóptero de dos grados de libertad. Vol. 15 N° 2 (Julio-Diciembre 2015); pp. 47-57.

Amplificadores de potencia para aplicaciones de microondas basados en dispositivos GaN. Vol. 16 N° 1 (Enero-Junio 2016); pp. 22-26

**SALAMANCA FIGUEROA, FABIÁN ANDRÉS**

Prototipo de monitoreo y alarma para la detección de heladas blancas en sectores rurales de Sogamoso. Vol. 18 N° 1 (Enero-Junio 2018); pp. 57-63.

**SALAMANCA MEDINA, EDGAR LEONARDO**

Modelamiento físico a escala de pilotes individuales, de cabeza libre, sometidos a carga lateral en suelos cohesivos. Vol. 17 N° 2 (Julio-Diciembre 2017); pp. 73-82.

**SALCEDO MONCADA, BRYAN FERNANDO**

Modelo matemático para administrar el inventario del banco de sangre de un centro hospitalario. Vol.18 N°2 (Julio-Diciembre 2018); pp. 5-14

**SÁNCHEZ ORTIZ, NELSON**

Potencial en el uso de la consulta de patentes para determinar el estado de la técnica. Análisis en microrredes con energías renovables. Vol. 17 N° 2 (Julio-Diciembre 2017); pp. 16-22.

**SELEEY, DANIEL ARENAS**

Mapeo de objetos a través de un motor de datos NOSQL, caso de estudio: framework para desarrollo de aplicaciones web. Vol. 16 N° 1 (Enero-Junio 2016); pp. 63-73.

**SUÁREZ DÍAZ, LAURA MELISA**

Estandarización del proceso de fundición para arenas con resinas autofraguantes en la industria militar fábrica Santa Bárbara. Vol. 15 N° 1 (Enero-Junio 2015); pp. 13-19.

**SUÁREZ FAJARDO, CARLOS ARTURO**

Reconfigurable architecture based on fiber bragg gratings for convergent optical indoor networks. Vol. 16 N° 1 (Enero - Junio 2016); pp. 55-62.

**SUARÉZ RODRÍGUEZ, WILLMAR ARBEY**

Prototipo de monitoreo y alarma para la detección de heladas blancas en sectores rurales de Sogamoso. Vol. 18 N° 1 (Enero-Junio 2018); pp. 57-63.

**T**

**TABARES CATIMAY, JENNIFER**

Modelación matemática de techos verdes en Colombia: selección de un modelo mediante la metodología AHP. Vol.18 N°2 (Julio-Diciembre 2018); pp. 35-46.

**TINJACÁ SOLER, JONATHAN JAVIER**

El amplificador de potencia Doherty con etapa de pre-amplificación. Vol. 15 N° 2 (Julio-Diciembre 2015); pp. 42-46.

**TIQUE PINTO, VÍCTOR HUGO**

Uso de herramientas tecnológicas en la producción piscícola: una revisión sistemática de literatura. Vol. 17 N° 2 (Julio-Diciembre 2017); pp. 47-56.

**TORRES BARAHONA, EDGAR ABSALÓN**

Sistema de posicionamiento de una antorcha utilizada en la aplicación de recubrimientos por proyección térmica. Vol. 16 N° 2 (Julio-Diciembre 2015); pp. 51-61.

**TORRES, DANIEL**

Análisis y comparativo de los amplificadores ópticos SOA, EDFA y RAMAN. Vol.18 N°2 (Julio-Diciembre 2018); pp. 22-28.

**TORRES, OMAR E.**

Contaminación por metales pesados: implicaciones en salud, ambiente y seguridad alimentaria. Vol. 16 N° 2 (Julio-Diciembre 2016); pp. 66-77.

**V**

**VALBUENA, YAIR**

Audio effects on haptics perception during drilling simulation. Vol. 17 N° 2 (Julio-Diciembre 2017); pp. 6-15.

### **VALENCIA ZULUAGA, TOMÁS**

Potencial en el uso de la consulta de patentes para determinar el estado de la técnica. Análisis en microrredes con energías renovables. Vol. 17 N° 2 (Julio-Diciembre 2017); pp. 16-22.

### **VERA ROMERO, IVÁN**

Desarrollo de una aplicación para el cálculo de las propiedades de la mezcla amoniaco-agua. Vol. 17 N° 2 (Julio-Diciembre 2017); pp. 58-72.

### **VARGAS ORTIZ, NELSON JOMAN**

Comportamiento mecánico de material compuesto reforzado con fibras de chontaduro (BACTRIS GAPISAPES). Vol.18 N°2 (Julio-Diciembre 2018); pp. 29-34.

### **VELAZCO VIVAS, ALEXANDRA**

Audio effects on haptics perception during drilling simulation. Vol. 17 N° 2 (Julio-Diciembre 2017); pp. 6-15

### **VERGARA, INÉS**

Contaminación por metales pesados: implicaciones en salud, ambiente y seguridad alimentaria. Vol. 16 N° 2 (Julio-Diciembre 2016); pp. 66-77.

### **VIGNE, GABRIELE**

Túneles con paramentos rugosos y con cavidades. Vol. 15 N° 1 (Julio-Diciembre 2015); pp. 58-69.

### **VILLALBA MORALES, MARÍA LUISA**

Una revisión sistemática de literatura sobre la gestión de la propiedad intelectual en instituciones de educación superior. Vol.18 N°2 (Julio-Diciembre 2018); pp. 47-59.

### **VILLAMIZAR MARTÍN, JIMMY**

Pulsos y probabilidad de ocurrencia de inundación de la laguna de Fúquene. Vol. 18 N° 1 (Enero-Junio 2018); pp.46 -56.

### **VILLATE DIAZ, JUAN PABLO**

Comportamiento mecánico de material compuesto reforzado con fibras de chontaduro (BACTRIS GAPISAPES). Vol.18 N°2 (Julio-Diciembre 2018); pp. 29-34.

## **Z**

### **ZAMBRANO MIRANDA, CÉSAR ALEJANDO**

Diseño de un banco para la determinación práctica del coeficiente de válvulas norma VDI/VDE 2173. . Vol. 18 N°1 (Enero-Junio 2018); pp. 5-15.

### **ZAMUDIO HUERTAS, EDUARDO**

Pulsos y probabilidad de ocurrencia de inundación de la laguna de Fúquene. Vol. 18 N° 1 (Enero-Junio 2018); pp.46 -56.



# REVISTA INGENIERÍA, INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA SECCIONAL SOGAMOSO

## SUSCRIPCIÓN / SUBSCRIPTIONS

Nombre/Name: \_\_\_\_\_ C.C. \_\_\_\_\_

Apellidos/Last Name: \_\_\_\_\_

Profesión/Profession: \_\_\_\_\_

Departamento académico/Academic department: \_\_\_\_\_

Dirección de Envío/Address: \_\_\_\_\_

Teléfono/Telephone Number : \_\_\_\_\_ ext \_\_\_\_\_ Fax: \_\_\_\_\_

Oficina/: \_\_\_\_\_

Ciudad/City: \_\_\_\_\_

País/Country: \_\_\_\_\_

Correo Electrónico/Email: \_\_\_\_\_

Suscripción a partir del número/ Subscription from number : \_\_\_\_\_

Firma: \_\_\_\_\_

Envíe este formato totalmente diligenciado a: [revistaiid@uptc.edu.co](mailto:revistaiid@uptc.edu.co); a vuelta de correo recibirá el ejemplar solicitado de la revista I<sup>2</sup>+D. La suscripción a la Revista I<sup>2</sup>+D es totalmente gratuita.

## Correspondencia, Canje y Suscripciones

REVISTA INGENIERÍA, INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO I<sup>2</sup>+D  
Calle 4 Sur N° 15-134 Tels.: (57+8) 7705450, 770 6896, 770 7721 Ext. 2606  
Uptc Sogamoso-Boyacá, Colombia  
E-mail: [revistaiid@uptc.edu.co](mailto:revistaiid@uptc.edu.co)  
[www.uptc.edu.co/enlaces/ringinvedesa](http://www.uptc.edu.co/enlaces/ringinvedesa)  
DOI: <http://dx.doi.org/10.19053/issn.1900-771X>