



UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

REVISTA Ingeniería

Volumen 21 • Número 3 • ISSN 0121-750X • E-ISSN 23448393

REVISTA CIENTÍFICA CUATRIMESTRAL

2016

REVISTA Ingeniería

Volumen 21 · Número 3 · Año 2016 · ISSN 0121-750X · E-ISSN 2344-8393

REVISTA CIENTÍFICA CUATRIMESTRAL



UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

Carrera 7 No. 40-53
Edificio Administrativo
Piso 4 - Facultad de Ingeniería
Bogotá, Colombia
Teléfono: + 57 (1) 323 93 00 ext. 2413
Correo revista:
revista.ing@udistrital.edu.co

<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reving>

POSTURA EDITORIAL Y AUDIENCIA

Su principal objetivo es difundir y debatir avances en investigación y desarrollo en las diferentes áreas de la ingeniería, con artículos de contenido original e inédito. La revista está dirigida a investigadores, especialistas, docentes, estudiantes de pregrado y posgrado, ingenieros en ejercicio y al sector empresarial

EDITOR

Sergio A. Rojas, PhD.
Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia

COMITÉ EDITORIAL

Sarah Greenfield, PhD.
Faculty of Technology of
Monfort University,
Reino Unido

Diego Cantor, PhD.
University of Western Ontario
Robarts Research Institute, Canadá

Jose Marcio Luna, PhD.
Perelman School of Medicine,
University of Pennsylvania, Estados Unidos

José Luis Villa, PhD.
Universidad Tecnológica de
Bolívar, Colombia

Luz Esperanza Bohórquez, PhD.
Universidad Distrital Francisco
José de Caldas, Colombia

Carlos Andrés Peña, PhD.
Institute for Information and Commu-
nication- Haute Ecole d'Ingénierie et
de Gestion du Canton de Vaud, Suiza

Iván Santelices Malfanti, PhD.
Universidad del Bio-Bio,
Chile

Carlos Eduardo Moreno, PhD.
Universidad Nacional de
Colombia

Víctor Hugo Grisales, PhD.
Universidad Nacional de
Colombia

Juan Carlos Figueroa, PhD.
Universidad Distrital Francisco
José de Caldas, Colombia

COMITÉ CIENTÍFICO

Rodrigo Herrera, MSc.
Universidad Distrital Francisco
José de Caldas, Colombia

Marco Aurelio Alzate, PhD.
Universidad Distrital Francisco
José de Caldas, Colombia

Germán Méndez, PhD.
Universidad Distrital Francisco
José de Caldas, Colombia

Ana María Peña, PhD.
Universidad Distrital Francisco
José de Caldas, Colombia

Germán Jairo Hernández, PhD.
Universidad Nacional
de Colombia

Diego Pardo Ayala, PhD.
Agile and Dexterous Robotics
Lab - ETHZ, Suiza

Edwin Rivas, PhD.
Universidad Distrital Francisco
José de Caldas, Colombia

Henry Alberto Diosa, PhD.
Universidad Distrital Francisco
José de Caldas, Colombia

DIRECTIVAS

Carlos Javier Mosquera S.
Rector (E)

Nelson Libardo Forero Chacón, PhD.
Director Centro de Investigación
y Desarrollo Científico

Roberto Ferro Escobar, PhD.
Decano de la Facultad de Ingeniería

PREPARACIÓN EDITORIAL

Carolina Suárez R., MSc.
Gestora Editorial

Jenny Alexandra Jimenez, MSc.
Corrección de Estilo

Julian Arcila-Forero, MSc(e).
Diagramación $\text{L}^{\text{A}}\text{T}_{\text{E}}\text{X}$

Editorial Kimpres
Impresión

INDIZADA EN



CARATULA

La portada alude a la perspectiva de diseño de sistemas artificiales desde la mirada de la auto-similitud, la invariancia a la escala y la emergencia, atributos inherentes a los sistemas naturales complejos.

Idea creativa:
Sergio A. Rojas y Carolina Suárez R.

Diseño:
Liliana Valencia.

ÁRBITROS EN ESTA EDICIÓN

Manuel Arana Jiménez, PhD.
Universidad de Cádiz, España

Carolina Suárez Roldan, MSc.
Universidad Cooperativa de
Colombia

Juan Carlos Figueroa, PhD.
Universidad Distrital FJDC, Colombia

Andrés Felipe Cerón Piamba, MSc.
Universidad del Valle, Colombia

Helmuth Trefftz Gómez, PhD.
Universidad EAFTT, Colombia

Henry Carrillo Lindado, PhD.
Universidad Sergio Arboleda,
Colombia

Carlos A. Vargas Isaza, MSc.
Instituto Tecnológico Metropolitano,
Colombia

Walter Hugo Arboleda, MSc.
Corporación Universitaria Adventista,
Colombia

Eddy Janneth Mesa, PhD(c).
Universidad Nacional de Colombia

Libardo Enrique Mendoza, PhD.
Universidad Nacional de Colombia

Henry Arguello Fuentes, PhD.
Universidad Industrial de Santander,
Colombia

Manuel Castañón-Puga, PhD.
Autonomous University of Baja California,
México

Mauricio González Colmenares, MSc.
Universidad Distrital FJDC, Colombia

Jorge Parra Amaris, MSc.(c).
Universidad Nacional de Colombia

Jairo E. Márquez, MSc.
Universidad de Cundinamarca, Colombia

Rocio Redón de la Fuente, PhD.
Centro de Ciencias Aplicadas
y Desarrollo Tecnológico,
UNAM, México

Ángel José Chacón, PhD.
Universidad Pedagógica y Tecnológica,
Colombia

Luz Esperanza Bohórquez, PhD.
Universidad Distrital FJDC, Colombia

José Humberto Serrano Devia, MSc.
Universidad Distrital FJDC, Colombia

Janneth Rocío Secue Roncería, PhD.
Universidad Nacional de San Juan,
Argentina

Diana Ramírez Ríos, MSc.
Fundación FCIMEC, Colombia

Guillermo Aponte, PhD.
Universidad del Valle, Colombia

Gloria Patricia Jaramillo, PhD.
Universidad Nacional de Colombia

Angélica María Gil Pilonieta, PhD(c).
Universidad Pontificia Bolivariana,
Colombia

Beatriz Alexandra Arbeláez, MSc.
Universidad Sergio Arboleda,
Colombia

Javier Antonio Ballesteros, MSc.
Universidad Pedagógica y Tecnológica
de Colombia

Santiago Vargas Domínguez, PhD.
University College London, Inglaterra

Daniel Benenso Vallejo, PhD.
The University of Nottingham, Inglaterra

William Javier Guerrero, PhD.
Escuela Colombiana de Ingeniería,
Colombia

Angel Eustorgio Rivera, PhD.
Instituto Politécnico Nacional,
México

Antonio Aguilera Ontiveros, PhD.
El Colegio San Luis, México

Sergio A. Rojas, PhD.
Universidad Distrital FJDC, Colombia

Marco Alzate Monroy, PhD.
Universidad Distrital FJDC, Colombia

Cesar Cruz Hernandez, PhD.
Centro de Investigación Científica y de
Educación Superior de Enseñada,
Baja California, México

José Luis Villa, PhD.
Universidad Tecnológica de
Bolívar, Colombia

Carmenza Moreno Roa, MSc.
Universidad Distrital FJDC, Colombia

Jose Amozurrutia de María y Campos, PhD.
Universidad Nacional Autónoma
de México

PERMISO DE REPRODUCCIÓN

Open access



Los textos de los artículos incluidos en esta edición pueden ser utilizados y reproducidos con fines sin ánimo de lucro y dando crédito a los autores. Está trabajo se distribuye bajo la Licencia de Creative Commons

Reconocimiento – No comercial – Sin Obra Derivada 3.0 Unported.

Ni la Revista INGENIERÍA, Editor, Comité Editorial, Comité Científico, Facultad de Ingeniería de la Universidad Distrital F.J.C., otorgan ninguna garantía, expresa o implícita, a asumen responsabilidad alguna por la exactitud, completitud o utilidad de cualquier información, aparato, producto o proceso divulgado, o que represente que su uso no infrinja derechos privados. La mención o referencia a algún producto, proceso o servicio comercial en específico, por su marca comercial, marca registrada, fabricante o cualquier otra denominación, no implica ni constituye su endoso, recomendación endoso, recomendación o favorecimiento por parte de la Revista INGENIERÍA. Los juicios y opiniones expresadas por los autores en este medio son de su responsabilidad y no establecen, reflejan o comprometen los de la Revista INGENIERÍA.

COSTO DE PROCESAMIENTO DE ARTÍCULOS

La Revista INGENIERÍA no realiza ningún cobro por las postulaciones, evaluación y publicación de los artículos sometidos. La Universidad Distrital Francisco José de Caldas asume los gastos relacionados con el proceso de edición, gestión y publicación. Los Pares Evaluadores realizan su contribución de manera voluntaria y sin retribución económica.

CONTENIDO

EDITORIAL

- Guía Breve Sobre Tipificación de Artículos en INGENIERÍA** 255
A pocket guide of types of papers in INGENIERÍA journal
Sergio A. Rojas

Ingeniería de Sistemas

- Desarrollo Ágil de una Aplicación para Dispositivos Móviles. Caso de Estudio: Taxímetro Móvil** 260
Agile Application Development for Mobile Devices. Case Study: Mobile Taximeter
Angélica Babativa · Paula Briceño · Consuelo Nieto · Omar Salazar

Ingeniería Ambiental

- Análisis Termogravimétrico y Estudio Cinético de la Pirólisis de Residuos Sólidos Veterinarios** 276
Thermogravimetric Analysis and Kinetic Study on Pyrolysis of Veterinarian Solid Waste
Andrés Felipe Rojas González · Laura María Aranzazu Ríos

Ingeniería Mecánica

- Rediseño y Automatización de un Molde Para la Fabricación de Vitrinas Refrigeradas Usando Inyección de Espuma de Poliuretano** 290
Redesign and Automation of a Mold for Manufacturing of Refrigerated Display Cases Using Polyurethane Foam Injection
Eugenio Yime Rodríguez · Jheifer Páez Almentero

Inteligencia Computacional

- 3D Semantic Modeling of Indoor Environments based on Point Clouds and Contextual Relationships** 305
Modelado Semántico 3D de Ambientes Interiores basado en Nubes de Puntos y Relaciones Contextuales
Angie Alexandra Quijano Sarmiento · Flavio A. Prieto O.

- Análisis y Simulación del Comportamiento de Vorticidad para el Modelo de Partícula Auto-propulsada** 324
Analysis and Simulation of Vortex Behavior for Self-propelled Particle Model
Helbert Eduardo Espitia Cuchango · Jorge Iván Sofrony Esmeral

- Métrica de Hausdorff en el Ambiente Difuso** 346
Hausdorff Metric in the Fuzzy Environment
Carlos Orlando Ochoa Castillo · Laura Victoria Forero Vega

SECCIÓN ESPECIAL: Dossier Complejidad e Ingeniería

- Complejidad e Ingeniería de Sistemas Complejos** 360
Complexity and Complex Systems Engineering
Luz Esperanza Bohorquez Arévalo

- La Comprensión de las Organizaciones Empresariales y su Ambiente como Sistemas de Complejidad Creciente: Rasgos e Implicaciones** 363
Understanding of Business Organizations and their Environment as Systems of Increasing Complexity: Features and Implications
Luz Esperanza Bohórquez Arévalo

- Modelo de Encriptación Simétrica Basada en Atractores Caóticos** 378
Symmetric Encryption Model Based on Chaotic Attractors
José David Moreno · Fabio Andrés Parra · Rafael Esteban Huérfano · César Augusto Suárez · Edilma Isabel Amaya

- Modelación Integrada de Sistemas Socio-ecológicos Complejos: Caso de Estudio la Ecorregión de la Mojana** 391
Integrated Modeling of Complex Socio-ecological Systems: Case Study of the Mojana ecoregion
Paula Villegas · Nathaly Triviño · Jorge Escobar · Nelson Obregón · Mauricio González · Ramón González · María Flórez

- Transformación de la no-Complejidad a la Complejidad** 411
Transformation of non-Complexity to Complexity
Carlos Eduardo Maldonado

- Instrucciones para los Autores** 427

Guía breve de clasificación de artículos en INGENIERÍA

El asunto que nos ocupa en esta ocasión, aunque en apariencia obvio, suscita disensos y hasta opiniones antagónicas al examinarlo con detenimiento. Nos referimos a la clasificación de artículos publicados en revistas científicas de ingeniería: ¿Investigación?, ¿Reporte de caso?, ¿Desarrollo tecnológico?, ¿Revisión bibliográfica?, ¿Reflexión?, ¿Informe técnico?, ¿Recopilación de estado del arte? Aunque cada tipo tiene un propósito distinto, sus diferencias pueden llegar a ser sutiles y sus similitudes pueden causar confusiones que conllevan a distintas apreciaciones.

Surge pues la necesidad de establecer una taxonomía explícita para clasificar los artículos que sean sometidos o publicados en la Revista INGENIERÍA. De manera breve, esta nota brindará algunas orientaciones que sirvan de guía para que autores (y por extensión también editores, evaluadores y lectores) puedan tipificar acordemente tales postulaciones. La guía tiene un fin pragmático y la motiva la experiencia acumulada en la Revista; no pretende profundizar en el debate académico sobre este tema que ha sido ampliamente estudiado por notables investigadores desde tiempo atrás.

Se partirá de la premisa según la cual el propósito de la publicación científica es el de reportar nuevo conocimiento, en el sentido amplio de ser aportes originales al cuerpo de conocimientos existentes sobre una disciplina, técnica o problemática (no exclusivamente invenciones o novedades sin precedentes, sino también avances continuos en el saber). Es importante aquí diferenciar entre lo que se considera nuevo conocimiento y lo que significa desarrollo tecnológico e innovación, cuestiones que a menudo se equiparan indebidamente como resultados de investigación.

Al respecto tomaremos como referente el *Manual de Frascati* [1] donde se define como **investigación científica**, “el trabajo creativo llevado a cabo de forma sistemática para incrementar el volumen de conocimientos, incluido el conocimiento del hombre, la cultura y la sociedad. Cuando los nuevos conocimientos se refieren a los fundamentos de los fenómenos y hechos observables (...) se trata de investigación básica; en contraste, cuando tienen como objetivo una aplicación práctica específica se denominan investigación aplicada”.

Ahora bien, el *Manual de Oslo* [2] define el **desarrollo tecnológico** como: “aplicación de los resultados de la investigación, o de cualquier otro tipo de



Citación: S. Rojas, “Guía breve de clasificación de artículos en INGENIERÍA,” INGENIERÍA, vol. 21, no. 3, pp. 255-259, 2016.

© Los autores; titular de derechos de reproducción Universidad Distrital Francisco José de Caldas. En línea DOI: <http://dx.doi.org/10.14483/udistrital.jour.reveng.2016.3.ne01>

conocimiento científico, para la fabricación de nuevos materiales o productos, para el diseño de nuevos procesos, sistemas de producción o prestación servicios, o también para lograr una mejora tecnológica sustancial en alguno de ellos. El resultado estará materializado en un plano, esquema o diseño, así como en la creación de prototipos no comercializables; una vez se conviertan en aplicaciones industriales o se exploten comercialmente se convierten en **innovación**".

Se deduce de lo anterior que mientras la investigación genera nuevo conocimiento, el desarrollo tecnológico lo aplica en prototipos que pueden llegar a convertirse en productos comerciales innovadores. Y consecuentemente, los artículos científicos deben estar enfocados en reportar lo primero y no lo segundo. Para ponerlo en términos sencillos, asociaremos dicho nuevo conocimiento a la respuesta (solución) previamente desconocida, de una pregunta (problema) de investigación, actual, pertinente y relevante en el campo donde se plantea, encontrada a través de un método sistemático que admita la contrastación y la replicabilidad, cualidades que serán avaladas por pares expertos en el tema. Bajo esta interpretación, la clasificación de un artículo científico dependerá de la naturaleza del nuevo conocimiento que reporte, lo que nos lleva a plantear la siguiente tipificación:

- **Investigación:** son aquellos que abordan una pregunta sobre un aspecto disciplinar teórico o aplicado, usualmente mediante un estudio científico del comportamiento de un fenómeno o una situación bajo ciertas condiciones de control.
- **Metodología:** estudios enfocados en presentar un nuevo método de solución para una categoría particular de problemas, demostrando resultados favorables en comparación con el estado del arte o de la técnica. Son investigaciones específicamente dedicadas a validar las bondades y desventajas del método que proponen o a realizar caracterizaciones comparativas de varios métodos en dominios disímiles o inexplorados.
- **Revisión:** los que presentan análisis críticos, sistemáticos, delimitados y exhaustivos, sobre los avances, tendencias, resultados positivos y negativos, vacíos y futuras rutas de investigación encontrados en el actual estado del arte o de la técnica.
- **Perspectiva :** aquellos que, recurriendo a fuentes bibliográficas originales y con un discurso argumentativo y controversial, cuestionan el actual estado del arte o de la técnica, proponen visiones alternativas a las corrientes de pensamiento dominantes, critican la vanguardia de la disciplina o instigan un viraje hacia tópicos de investigación abandonados o desentendidos por la comunidad científica. Usualmente más que una reflexión personal, buscan establecer una posición colectiva (de comunidad científica), sustentada en una discusión que combina introspectiva, retrospectiva y prospectiva sobre el asunto en cuestión.
- **Reporte de Caso:** los que buscan divulgar un hallazgo novedoso encontrado durante o posterior a un caso particular de desarrollo tecnológico, que eventualmente podría generalizarse mediante una investigación más amplia (aplicada a mas casos) y que por lo tanto ameritan ser conocidos por la comunidad para convocarla en tal sentido. Más que enfatizar en el desarrollo tecnológico o innovación *per sé*, se enfocan en caracterizar el conocimiento descubierto en el caso de estudio respectivo.

- **Editoriales, Cartas al Editor, Artículo Invitado:** son las únicas categorías que no reportan nuevo conocimiento, sino que discuten temas de interés para la Revista, para su línea editorial o para su comunidad, con un carácter de opinión informada.

Pretendemos con esta tipificación ofrecer lineamientos más que directrices, previendo que es posible encontrar artículos que se acomoden fácilmente a alguna de las casillas, o se traslapen en varias de ellas o inclusive no encajen en ninguna, en cuyo caso se abrirá la posibilidad de un debate académico más amplio. De hecho esperaríamos que la tipificación se enriquezca y evolucione conforme la dinámica propia que la Revista le confiera. Por el momento complementaremos la guía con un cuadro sinóptico de las preguntas típicas en cada categoría, así como la estructura sugerida para organizar su contenido y referencias a trabajos recientemente publicados en la Revista, a manera de ejemplos.

| Tipo artículo | Preguntas típicas | Estructura sugerida |
|----------------------|---|---|
| Investigación | <p>¿En qué medida una variable/restricción previamente no estudiada permite mejorar el tiempo de respuesta/error/desempeño del sistema/mecanismo/planta/modelo de interés?</p> <p>¿Cómo caracterizar un comportamiento determinado de un fenómeno o situación de estudio bajo ciertas condiciones de control en escenarios no conocidos?</p> <p>¿Existe una relación causal entre dos variables del fenómeno o situación de estudio?</p> <p>¿Es posible abordar el problema objetivo mediante una técnica determinada manteniendo algunos criterios de calidad y mejorando otros que no se sabían?</p> <p>(Ejemplos: [3]–[8]).</p> | <p>Título</p> <p>Resumen</p> <p>Introducción</p> <p>Métodos y materiales</p> <p>Resultados</p> <p>Conclusión</p> <p>Referencias</p> |
| Metodología | <p>¿En qué grado mejora la efectividad/rapidez/complejidad el método propuesto para resolver un problema determinado en comparación con otros métodos ampliamente utilizados?</p> <p>¿Es viable adoptar el método estudiado para otro dominio de aplicación diferente a aquel en el que fue originalmente propuesto o con una parametrización diferente?</p> <p>¿Qué ventajas presenta la combinación de dos o más técnicas para resolver un problema particular en comparación a su aplicación independiente?</p> <p>¿Cómo se comportan comparativamente diferentes técnicas de solución a un problema determinado y bajo que condiciones es recomendable utilizar una u otra?</p> <p>(Ejemplos: [9]–[12]).</p> | <p>Título</p> <p>Resumen</p> <p>Introducción</p> <p>Método</p> <p>Validación</p> <p>Conclusión</p> <p>Referencias</p> |
| Revisión | <p>¿Qué tópicos de investigación se han abordado para la problemática de estudio, con que enfoques diferentes y bajo que suposiciones y que tópicos/enfoques/suposiciones aún no han sido abordados?</p> <p>¿Qué grupos/escuelas/investigadores/países u otra categoría lideran la investigación del tópico de interés en una ventana de tiempo dada y cuales son sus implicaciones?</p> <p>¿Qué resultados de carácter positivo y/o negativo se han registrado en un tópico de investigación determinado, en la ventana de tiempo considerada?</p> <p>¿Cuáles tendencias de investigación se identifican y cuales se vislumbran como prometedoras en un área de estudio?</p> <p>¿Qué lecciones aprendidas y orientaciones prácticas se pueden deducir del cuerpo de conocimiento existente en una problemática específica?</p> <p>(Ejemplos: [13]–[16]).</p> | <p>Título</p> <p>Resumen</p> <p>Introducción</p> <p>Métodos y materiales</p> <p>Resultados</p> <p>Conclusión</p> <p>Referencias</p> |

| Tipo artículo | Preguntas típicas | Estructura sugerida |
|---|---|---|
| Perspectiva | <p>¿Cómo han contribuido los paradigmas o corrientes de pensamiento que dominan la investigación en un tópico de interés, y que limitaciones tienen para la investigación futura?</p> <p>¿Qué tanto han desviado los recientes avances en un tema específico la atención de la comunidad respecto a otros problemas o técnicas relevantes y como se debería atender ese vacío?</p> <p>¿Es posible abordar un tópico de investigación dado, bajo unos nuevos supuestos que conduzcan a potenciales ventajas únicamente obtenibles bajo esa nueva interpretación?</p> <p>¿Qué implicaciones tiene el abandono del tópico/problema/asunto de investigación?</p> <p>(Ejemplos: [17]–[20]).</p> | <p>Título</p> <p>Resumen</p> <p>Introducción</p> <p>Desarrollo del tema</p> <p>Conclusión</p> <p>Referencias</p> |
| Reporte de Caso | <p>¿Es posible que el prototipo/diseño/plano desarrollado mediante el método o técnica haya presentado un comportamiento diferente al esperado al aplicarlo a un dominio particular?</p> <p>¿Qué tanto efecto positivo o negativo no documentado anteriormente, tuvo el ajuste de una variable/parámetro particular durante el desarrollo del prototipo/diseño/plano mediante el método/técnica/protocolo de estudio escogido?</p> <p>¿Es posible que el prototipo/diseño/plano desarrollado mediante el método o técnica haya presentado un comportamiento diferente al esperado al aplicarlo a un dominio particular?</p> <p>¿En qué medida el prototipo/diseño/plano mejor ó alguna medida de desempeño del fenómeno o situación en el que se aplicó ?</p> <p>(Ejemplos: [21]–[24]).</p> | <p>Título</p> <p>Resumen</p> <p>Introducción</p> <p>Métodos y materiales</p> <p>Resultados</p> <p>Conclusión</p> <p>Referencias</p> |
| Editorial o Cartas al Editor o Artículo invitado | <p>¿En qué estado se encuentra la actividad de la Revista recientemente?</p> <p>¿Cómo mejorar algún aspecto editorial particular de la Revista?</p> <p>¿Es posible que los autores de un artículo publicado anteriormente hayan omitido/ignorado/evadido alguna suposición/insumo/estudio que haya podido sesgar sus resultados?</p> <p>¿Qué eventos/temas de interés disciplinar/institucional/nacional/mundial de actualidad pueden tener repercusiones en la práctica o la disciplina ingenieril?</p> <p>(Ejemplos: [25]–[27]).</p> | <p>Título</p> <p>Desarrollo del tema</p> <p>Referencias (opcional)</p> |

Colofón: además de nuestros artículos regulares, en este número presentamos un dossier dedicado a una visión alternativa de la ingeniería desde la lupa de las ciencias de la complejidad; transmitimos nuestros inmensos agradecimientos a la Dra. Luz Esperanza Bohórquez, Editora Invitada, por su compromiso y diligencia para hacerlo realidad. E igualmente agradecemos y congratulamos a los demás autores, evaluadores, editores, correctores y diagramadores que hicieron parte de la elaboración de esta nueva edición. A nuestros lectores, esperamos que sea de su agrado.

Sergio A. Rojas, PhD.

Editor General Revista INGENIERÍA

Referencias

- [1] OCDE. *Manual de Frascati: Propuesta de Norma Práctica para Encuestas de Investigación y Desarrollo Experimental*. Organization for Economic Co-operation and Development (OECD), 2002
- [2] OCDE. *Manual de Oslo: Guía para la Recogida e Interpretación de Datos sobre Innovación*. Organization for Economic Co-operation and Development (OECD), 2005.
- [3] Bastidas Rodríguez, J. D., Ramos-Paja, C. A., & Franco Mejía, E. Modeling and parameter calculation of photo-voltaic fields in irregular weather conditions. *Ingeniería*, 17(1), 2012.
- [4] Muñoz Robles, L. V., Quiñónez Jiménez, E., & Victoria Pizo, H. Reconstrucción 3D De Objetos Sumergidos En Agua. *Ingeniería*, 18(2), 2013.

- [5] Gaona, P. A., Montenegro Marín, C. E., & Gonzalez, H. W. Hacia una Propuesta de Mecanismos para la Autenticidad de Objetos de Aprendizaje en Plataformas LCMS. *Ingeniería*, 19(1), 2014.
- [6] Rodríguez Rodríguez, C. D., & Melgarejo Rey, M. A. Arquitectura FPGA para simulación de aprovisionamiento de alimentos en colonias de hormigas artificiales. *Ingeniería*, 20(2), 2015.
- [7] Mejía Fajardo, M., & Alzate Monroy, M. A. Clasificación Automática de Formas Patológicas de Eritrocitos Humanos. *Ingeniería*, 21(1), 2016.
- [8] Salazar, O., Rojas, J. D., & Serrano, H. Nie-Tan Method and its Improved Version: A Counterexample. *Ingeniería*, 21(2), 2016.
- [9] Berrio, J. S., Orozco Ordóñez, S., & Caicedo, E. F. Extracción de Líneas a partir de Escaneos Láser integrando Transformada de Hough, Mínimos Cuadrados Totales y Seguimiento de Bordes Sucesivos. *Ingeniería*, 17(1), 2012.
- [10] López-Santana, E. R., & Romero Carvajal, J. D. J. A hybrid column generation and clustering approach to the school bus routing problem with time windows. *Ingeniería*, 20(1), 2015.
- [11] Figueroa-García, J. C., Patiño-Callejas, J. S., & Espinosa-Ayala, K. Y. An Approach for Solving Goal Programming Problems using Interval Type-2 Fuzzy Goals. *Ingeniería*, 20(2), 2015.
- [12] Avellaneda González, J. A., Ochoa Rey, C. M., & Figueroa García, J. C. Comparación entre un sistema neuro difuso auto organizado y un modelo ARIMAX en la predicción de series económicas volátiles. *Ingeniería*, 17(2), 2012.
- [13] Barón, M., Huertas, I., & Orjuela Castro, J. A. Gestión de la cadena de abastecimiento del biodiésel: una revisión de la literatura. *Ingeniería*, 18(1), 2013.
- [14] Pérez Mantilla, F. A. & Torres Delgado, J. F. Modelos de Inventarios con Productos Perecederos: Revisión de la Literatura. *Ingeniería*, 19(2), 2014.
- [15] Aranda Pinilla, J. A., & Orjuela Castro, J. A. Optimización multiobjetivo en la gestión de cadenas de suministro de biocombustibles. Una revisión de la literatura. *Ingeniería*, 20(1), 2015
- [16] Ramos Sandoval, O. L., Gama Melo, E. N., & Amaya Hurtado, D. Revisión de las tecnologías y aplicaciones del habla sub-vocal. *Ingeniería*, 20(2), 2015.
- [17] Orjuela Castro, J. A., & Herrera Ramírez, M. M. Perspectiva de Trazabilidad en la Cadena de Suministros de Frutas: Un Enfoque desde la Dinámica de Sistemas. *Ingeniería*, 19(2), 2014
- [18] Gallego Torres, A. P., & Castro Montaña, J. E. Sobre el rol innovador de la educación energética para la investigación en ingeniería. *Ingeniería*, 19(2), 2014.
- [19] Bohórquez, L. La comprensión de las organizaciones empresariales y su ambiente como sistemas de complejidad creciente: rasgos e implicaciones. *Ingeniería*, 21(3), 2016
- [20] Maldonado Castañeda, C. Transformación Fractal De La Linealidad En No-linealidad. *Ingeniería*, 21(3), 2016.
- [21] Riaño Gómez, D. A., Salazar Morales, O., & Soriano Méndez, J. J. Ratón USB para personas tetrapléjicas controlado con el movimiento de la cabeza. *Ingeniería*, 19(2), 2014.
- [22] Yime, E., & Páez, J. Rediseño y Automatización de un Molde para la Fabricación de Vitrinas Refrigeradas usando Inyección de Espuma de Poliuretano. *Ingeniería*, 21(3), 2016
- [23] Babativa Goyeneche, A., Briceño Novoa, P., Nieto Lemus, A., & Salazar Morales, O. Desarrollo ágil de una aplicación para dispositivos móviles. Caso de estudio: Taxímetro móvil. *Ingeniería*, 21(3), 2016.
- [24] Chanchí, G. E., Campo Muñoz, W. Y. & Arciniegas Herrera, J. L. Construcción de Servicios Interactivos en Entornos de Televisión Digital. *Ingeniería*, 21(1), 201
- [25] Dios, H. La universidad que vivimos...una ruta para lograr la universidad que soñamos.... *Ingeniería*, 19(1), 2014.
- [26] Rojas, S. A. Distinto, diferente o una crítica del plagio. *Ingeniería*, 19(2), 2014.
- [27] Rojas, S. A. Resúmenes estructurados: rápidos y furiosos. *Ingeniería*, 20(2), 2015.

Reporte de caso

Desarrollo Ágil de una Aplicación para Dispositivos Móviles. Caso de Estudio: Taxímetro Móvil

Agile Application Development for Mobile Devices. Case Study: Mobile Taximeter

Angélica Babativa¹, Paula Briceño¹, Consuelo Nieto¹, Omar Salazar¹

¹Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Correspondence email: acnietol@udistrital.edu.co

Recibido: 29-03-2016. Modificado: 13-06-2016. Aceptado: 18-07-2016

Resumen

Contexto: La globalización ha afectado todos los sectores productivos y, en particular, la industria del software, lo cual ha requerido el desarrollo de nuevas metodologías que se adapten a las velocidades de los cambios y permitan construir rápidamente productos que satisfagan los requerimientos de los clientes. Por otro lado, la tecnología GPS, la conectividad 4G y la integración de redes sociales con las que cuentan la mayoría de teléfonos móviles actuales han abierto un campo grande de aplicación, en particular en el área del transporte, la movilidad y la denuncia ciudadana, cuyo desarrollo puede ser abordado con éxito mediante una metodología ágil.

Método: Se utilizó la metodología ágil Scrum para el desarrollo de una aplicación móvil sobre el sistema operativo Android y tecnología GPS, que le permite a un usuario de taxi en Bogotá monitorear el recorrido y enviar una denuncia a la red social Twitter en caso de inconformidad. Para el análisis y diseño se utilizaron algunos modelos de UML y se aplicó un intervalo de confianza para validar los resultados.

Resultados: Prototipo de un taxímetro móvil desarrollado con una metodología ágil, que satisface características de calidad, extensibilidad y mantenibilidad. Se utilizó una distribución t-student para validar la medición del prototipo sobre 50 muestras, concluyendo que la diferencia entre la medición de un taxímetro real y la del taxímetro móvil es en promedio dos unidades con una desviación estándar de 1,39 unidades.

Conclusiones: Se muestra que con el desarrollo ágil se pueden combinar herramientas de modelado UML y técnicas de validación estadísticas para obtener productos de calidad, que no violan, sino que, por el contrario, reafirman los principios del desarrollo ágil.

Palabras clave: Android, dispositivos móviles, redes sociales, Scrum, taxímetro GPS.

Idioma: Español



Citación: A.M. Babativa, P.D. Briceño, A.C. Nieto, O. Salazar, "Desarrollo Ágil de una Aplicación para Dispositivos Móviles. Caso de Estudio: Taxímetro Móvil," INGENIERÍA, vol. 21, no. 3, pp. 260-275, 2016.

© Los autores; titular de derechos de reproducción Universidad Distrital Francisco José de Caldas. En línea DOI: <http://dx.doi.org/10.14483/udistrital.jour.reveng.2016.3.a01>

Abstract

Context: Globalization has affected all productive sectors and in particular the software industry, which has required the development of new methodologies to suit the speed of the changes and allow quickly build products that meet the requirements of the customers. On the other hand, the GPS technology, 4G connectivity and integration of social networks that have the most current mobile phones have opened a large field of application, particularly in the area of the transport, mobility and citizen complaint, whose development can be successfully addressed through an agile methodology.

Method: Agile methodology Scrum was used for the development of a mobile application on the Android operating system and GPS technology, which allows a Bogota taxi user to monitor the route and send a complaint to the social network Twitter in case of nonconformity. Some UML models were used for analysis and design of the application, and a confidence interval was used to validate the results.

Results: Prototype of a mobile taximeter developed with an agile methodology that meets quality characteristics, extensibility and maintainability. T-student distribution was used to validate the measurement of the prototype on 50 samples, concluding that the difference between the measurement of a real taximeter and our mobile taximeter is on average 2 units with a standard deviation of 1,39 units.

Conclusions: It is shown that with the agile development can be combined with UML modeling tools and statistical validation techniques for quality products that do not violate, but on the contrary, that reaffirm the agile development principles.

Keywords: Android, GPS taximeter, mobile devices, Scrum, social network.

1. Introducción

Hoy en día hay en el mundo más dispositivos móviles que computadores [1], [2] y muchas personas los utilizan no solo como medio de comunicación, sino también para acceder a servicios comerciales, financieros, de entretenimiento, de transporte, de denuncia ciudadana, entre otros. Es por esto que el desarrollo de aplicaciones móviles se ha expandido en los últimos años debido, por un lado, a la masificación de los teléfonos móviles y al acceso a servicios de datos, y por otro, a la aparición de herramientas de software que facilitan su desarrollo.

Además de tener un amplio campo de aplicación, las aplicaciones móviles tienen unas características que las diferencian de una aplicación web o de escritorio [3], [4]: uso de menos interfaces físicas y más interfaces gráficas para la interacción, uso limitado de memoria, almacenamiento y procesamiento; desarrollo para múltiples plataformas como *Android*, *BlackBerry*, *iPhone/iPad*; procesos de despliegue y de mantenimiento flexibles.

Las múltiples características que incluyen los dispositivos móviles (pantalla táctiles, cámara, GPS, conectividad Bluetooth, Wifi, 3G, 4G) han motivado una gran demanda de aplicaciones en una variedad de escenarios, en particular en el campo del tráfico, la movilidad y el servicio de taxis [5]–[10], pero la demanda de nuevas aplicaciones y la versatilidad de algunas herramientas de software ha llevado a que el desarrollo se haga sin un marco metodológico formal que asegure su calidad y mantenimiento.

En la literatura se encuentran varias propuestas para el desarrollo de aplicaciones móviles, que van desde algunas modificaciones a las metodologías clásicas hasta la adopción de metodologías ágiles. En [3] se presenta el marco de trabajo denominado Mobile Application Development Life Cycle (MADLC, por sus siglas en inglés) que considera las etapas de identificación, diseño, implementación, prototipado, pruebas, despliegue y mantenimiento, pero en el que no se hace énfasis en el tratamiento ágil del desarrollo. En [8] se presenta una propuesta para la construcción rápida de aplicaciones móviles mediante un generador de código que facilita la implementación de tareas repetitivas (ejecución de ciertos comandos con el teclado, manejo de menús, conexión a una base de datos, envío de SMS), pero no se abordan los aspectos metodológicos. En [4] se propone una *framework* genérico para desarrollar aplicaciones móviles sobre diferentes sistemas operativos, pero tampoco discute el tema metodológico.

En este artículo se presenta el desarrollo de una aplicación móvil sobre el sistema operativo *Android* que le permitirá a un usuario del servicio público de taxi en la ciudad de Bogotá D.C., monitorear el recorrido mediante la tecnología *GPS*, determinar la tarifa del servicio y enviar una denuncia a la red social Twitter en caso de inconformidad. Se ilustra el uso detallado de la metodología ágil *Scrum*, el empleo de algunos modelos de *UML* para el análisis y diseño, y se muestra la aplicación de técnicas estadísticas para validar el requerimiento no funcional de confiabilidad en casos en que el software puede entregar resultados diferentes, dadas las mismas entradas debido a variables del entorno (calidad de señal de GPS debido al clima, edificios altos y otros obstáculos, u otras razones externas a la aplicación) que afectan el comportamiento del sistema.

1.1. Descripción del caso de estudio

El servicio público de taxis ha adquirido mucha importancia en los últimos años, dado los beneficios de movilidad que ofrece a la ciudadanía. Un 42.3% [11] de la población bogotana prefiere este servicio para desplazarse a su trabajo, sitio de estudio o lugar de vivienda, dada la comodidad, rapidez y servicio puerta a puerta que ofrece. Sin embargo, a medida que ha aumentado la demanda de este servicio también se ha incrementado el número de usuarios inconformes con el cobro de la tarifa por parte de los taxistas [12]. Lo anterior ha generado altercados, desconfianza y zozobra en los usuarios, poniéndose en riesgo la demanda de este tipo de transporte.

Una de las opciones que ha surgido para el cálculo de la tarifa en taxis es el taxímetro con GPS [13]. Aunque dicha tecnología presenta ciertas limitaciones para la medición precisa debido a que la señal se debilita ante la presencia de edificios muy altos o zonas de escasa cobertura, los simuladores de taxímetros con GPS permiten calcular el valor de la tarifa aproximándose bastante a la tarifa total a pagar [14]. Para calcular el valor del recorrido, el GPS indica la velocidad y el tiempo transcurrido de una carrera, de esta manera el taxímetro no va conectado a ningún sensor de velocidad ni de movimiento y el pasajero viaja más tranquilo, pues la probabilidad de que el taxímetro esté adulterado es mínima. Algunas aplicaciones móviles como *Taxímetro GPS* [9] y *Taxiando* [15] utilizan la tecnología GPS y si bien simulan el funcionamiento de un taxímetro, presentan algunos inconvenientes como demora al iniciar la aplicación, las unidades corren más rápido que el taxímetro real, manejan mucha publicidad, no permiten guardar datos de los recorridos ni manipularlos para generar reportes, entre otros.

El objetivo de este trabajo fue implementar una aplicación móvil utilizando la tecnología GPS que viene incorporada en los dispositivos móviles con sistema operativo *Android*. No solo se propuso resolver las limitaciones de las aplicaciones anteriormente mencionadas, sino que además se consideraron las tarifas específicas definidas anualmente por la Secretaría Distrital de Movilidad para la ciudad de Bogotá D.C., [16] y se extendió la funcionalidad para enviar un mensaje a la red social *Twitter* con la placa del taxi, la empresa a la que está vinculado, el número de unidades del recorrido, el valor calculado por la aplicación y el cobrado por el taxista, como una forma de denuncia social.

1.2. Cálculo del servicio de taxi

Para el cálculo del cobro del servicio de taxi, se hace uso del taxímetro como instrumento de medición, el cual le indica al pasajero la cantidad total que debe pagar según las unidades marcadas basándose en la distancia recorrida y el tiempo transcurrido. Para calcular el valor a pagar, cada una de las unidades que marca tiene un equivalente en distancia y en tiempo: se marca una unidad por cada 100 metros recorridos o por cada 30 segundos de espera [17]. La cantidad fija es un valor económico acreditado legalmente por la Secretaría Distrital de Movilidad [16] para el pago de los servicios del transporte retribuido a los taxistas, la cual se compone de:

1.2.1. Costo inicial

También llamado *banderazo*; se refiere al valor en el que inicia el taxímetro al momento de ser puesto en servicio. De acuerdo a la Alcaldía Mayor de Bogotá [16], se estipuló que para el año 2014-2015, el *banderazo* sería de 25 unidades, que corresponden a \$2000 pesos.

1.2.2. Costo del incremento

Se refiere al valor económico habitual y constante en el que va aumentando de las unidades del taxímetro a partir del costo inicial.

1.2.2.1 Costo por función tiempo

Es un valor monetario que se calcula a partir de la siguiente fórmula [18]:

$$c.p.f.t = \frac{[(segundos) * (costo por hora de servicio)]}{3600}$$

En donde *segundos* corresponde a la cantidad de tiempo en la que el taxi ha registrado una velocidad menor o igual a la velocidad de cambio de arrastre, y *costo por hora de servicio* es el valor fijado por la Alcaldía Mayor de Bogotá [16]. Se estipuló que para el año 2014-2015, el costo por hora sería de 225 unidades, que corresponden a \$17600 pesos. El costo por la función tiempo es sumado al acumulador interno de costo a medida que se vaya generando.

1.2.2.2 Costo por función de distancia

Es un valor monetario que se calcula a partir de la siguiente fórmula [18]:

$$c.p.f.d = \frac{[(metros\ recorridos) * (costo\ Kilometro)]}{1000}$$

En donde *metros recorridos* corresponde a la distancia recorrida durante el servicio, y *costo por kilómetro* es el resultado de la suma de los costos fijos, variables y de capital calculados por la autoridad competente. De acuerdo a la Alcaldía Mayor de Bogotá [16], se estipuló que para el año 2014-2015, el costo por kilómetro corresponde a \$780 pesos. El costo por la función distancia es sumado al acumulador interno de costo a medida que se vaya generando.

2. Metodología

El desarrollo de aplicaciones móviles debe, por un lado, considerar las características particulares de los dispositivos como las restricciones de memoria, procesamiento y almacenamiento, implementación de plataforma cruzada, procesos de despliegue y mantenimiento [3], [4], y por otro, debe responder rápidamente a la creciente demanda de soluciones móviles. Si bien las metodologías ágiles han sido empleadas tradicionalmente en aplicaciones web y de escritorio, las características anteriores las hacen apropiadas en el campo del software móvil. Si bien las metodologías ágiles han sido empleadas tradicionalmente en aplicaciones web y de escritorio, las características anteriores también las hacen apropiadas en el campo del software móvil, como se muestra en [19] con el uso de la metodología de Proceso Unificado Ágil (AUP) para el desarrollo, tanto de una aplicación de escritorio, como para una aplicación móvil. Este documento presenta un caso práctico del uso de la metodología ágil *Scrum* [20] en el desarrollo de una aplicación móvil para el control de la tarifa del servicio público de taxi en la ciudad de Bogotá D.C., en el que se muestra que para alcanzar altos estándares de calidad y mantenibilidad se pueden integrar algunos artefactos de UML en el análisis y diseño, y utilizar técnicas estadísticas para la validación de los resultados, sin violar los principios del manifiesto ágil [21].

2.1. Planeación del proyecto–ProductBacklog

Para la planeación, seguimiento y gestión del proyecto se hizo uso de *IceScrum* [22], aplicación web de código abierto que soporta la metodología *Scrum*. Inicialmente se construyó el *Product-Backlog*, documento en el que se agruparon las historias de usuario funcionales y no funcionales; se establecieron los *Sprints* y se asociaron las historias a cada *Sprint*. Para manejar el cambio, el proceso de desarrollo fue iterativo e incremental, pues a medida que se iba avanzando en el desarrollo se encontraron algunas historias de usuarios que eran redundantes, otras en las que se debía especificar con mayor detalle la lógica de negocio y otras que debían desarrollarse a lo largo de varios *Sprints*.

Se definieron cuatro tipos de historias de usuario para su adecuada visualización y seguimiento en *IceScrum* (Figura 1): Gestión de tarifas, Medición, Notificación y Validación. Se establecieron

| Sprint 1 From 17/04/2015 to 01/05/2015 | Sprint 2 From 02/05/2015 to 16/05/2015 | Sprint 3 From 17/05/2015 to 31/05/2015 | Sprint 4 From 01/06/2015 to 15/06/2015 | Sprint 5 From 16/06/2015 to 30/06/2015 | Sprint 6 From 01/07/2015 to 15/07/2015 |
|--|---|--|--|--|--|
| 1. Construcción de las historias de usuario | 5. Diagrama de componentes | 9. Cargar modelo de tarifa | 13. Contabilizar recargos | 16. Almacenar información del servicio | 18. Notificar y actualizar modelo de tarifa |
| 2. Prototipo de las historias de usuario | 6. Modelo de base de datos | 10. Iniciar contadores | 14. Seleccionar recargos | 17. Generar informe con los datos del servicio | 19. Notificar queja en Twitter |
| 3. Modelo de Requerimientos | 7. Verificar la solicitud de activación del GPS | 11. Iniciar medición | 15. Calcular valor de la carrera | | |
| 4. Diagrama de clases | 8. Mostrar la ubicación del usuario en el mapa | 12. Actualizar mapa | | | |

Figura 1. Sprints e historias de usuario por tipo

siete *Sprints*, cada uno con más o menos un mes de duración, incluyendo el *Sprint 0* en el que se adelantaron tareas de investigación y prototipado acerca del uso de las herramientas tecnológicas.

2.2. Documentación de las historias de usuarios

Debido a que *IceScrum* solo permite incluir cierta información para cada historia de usuario (nombre, tipo y descripción), como parte de este proyecto se elaboró una plantilla para registrar información adicional (Tabla I) que resultó muy útil, tanto para la implementación como para las pruebas.

Tabla I. Plantilla para documentar historias de usuario

| Historia de usuario | |
|--|--|
| Código: Hu_Not_01 | Nombre: Notificar queja en Twitter |
| Tipo HU: Funcional | Complejidad: A |
| Actor: Usuario | Hu_Relacionadas: Hu_Med.03, Hu_Med.04, Hu_Med.05, Hu_Med.06. |
| Modulo: Notificación | |
| Descripción: Si el usuario quiere reportar una situación anómala, puede difundirlo por medio de la red social Twitter | |
| Criterios de aceptación | |
| Condición: | Resultado: |
| Al finalizar el recorrido el usuario da click en la opción "Reportar" | Publica en la red social Twitter un reporte con los siguientes datos: Placas del taxi, empresa, unidades de diferencia, motivo del reporte y comentarios |

2.2.1. Dependencia entre las historias de usuario

La matriz de trazabilidad [23], [24] es una técnica bastante útil en el proceso de desarrollo de software, permite gestionar de manera adecuada los cambios que se pueden presentar a lo largo de un proyecto. Es decir, al momento de querer hacer una modificación, la gestión de cambios debe tener conocimiento previo de los requerimientos que pueden verse afectados directa e indirecta-

Tabla II. Matriz de trazabilidad de historias de usuario

| | | HISTORIAS DE USUARIO (A) DEPENDIENTES | | | | | | | | | |
|----------------|-----------|---------------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|--|
| HU vs. HU | Hu_Med.01 | Hu_Med.02 | Hu_Med.03 | Hu_Med.04 | Hu_Med.05 | Hu_Med.06 | Hu_Med.07 | Hu_Med.08 | Hu_Tar.01 | Hu_Not.01 | |
| INDEPENDIENTES | Hu_Med.01 | x | x | x | | | | | | | |
| | Hu_Med.02 | | x | x | | | | | | | |
| | Hu_Med.03 | | | x | x | x | x | x | | x | |
| | Hu_Med.04 | | | | x | x | x | x | | x | |
| | Hu_Med.05 | | | | | x | x | x | | x | |
| | Hu_Med.06 | | | | | | x | x | | x | |
| | Hu_Med.07 | | | | | | | x | | | |
| | Hu_Med.08 | | | | | | | | | | |
| | Hu_Tar.01 | | | | | | | | | x | |
| | Hu_Tar.02 | | | | | | | | | | |
| | Hu_Not.01 | | | | | | | | | | |

mente. De esta manera se evita que las historias de usuario queden inconsistentes y ambiguas a la hora de hacer un cambio.

En la Tabla II se muestra la matriz de trazabilidad de las historias de usuario asociadas al proyecto: en ésta matriz las filas representan las historias de usuario independientes y las columnas las historias que dependen de las primeras. Así, se puede observar que las historias de usuario HU_Med.003, HU_Med.004 y HU_Med.005 son las que más generan dependencias.

2.3. Definición y seguimiento de los Sprints del proyecto

Como se mencionó anteriormente, se definieron siete *Sprints* (Tabla III) con cerca de un mes de duración cada uno, con los que se cubrió todo el ciclo de vida del desarrollo de la aplicación, incluidas tareas de planificación, prototipado, análisis, diseño, implementación, validación y despliegue. Al inicio de cada Sprint se hizo la reunión de planeación (*Sprint Planning Meeting*) tomando como base la planeación inicial registrada en el *ProductBacklog* y al final del cada uno de ellos se hizo la reunión de revisión y retrospectiva (*Sprint Review Meeting* y *Sprint Retrospective*) con el fin de validar el resultado de las tareas propuestas y los ajustes que se debían hacer en el plan de los siguientes *Sprints*.

Tabla III. Sprints del proyecto con HU asociadas

| <i>Sprint</i> | Historias Planificadas |
|-----------------|---|
| <i>Sprint 0</i> | Documentación previa del desarrollo móvil. Desarrollo de un prototipo inicial de bajo nivel. Construcción de las historias de usuario. |
| <i>Sprint 1</i> | Prototipo de las historias de usuario. Modelo de requerimientos. Modelo de casos de uso. Arquitectura de la aplicación. Diagrama de clases. |
| <i>Sprint 2</i> | Modelo de base de datos. Verificar y solicitar la activación del GPS. Mostrar la ubicación del usuario en el mapa. Iniciar aplicación. |
| <i>Sprint 3</i> | Cargar modelo de tarifa. Iniciar medición. |
| <i>Sprint 4</i> | Contabilizar y seleccionar recargos. Calcular valor de la carrera. |
| <i>Sprint 5</i> | Almacenar información del servicio. Generar informe con los datos del servicio. Notificar y actualizar modelo de la tarifa. |
| <i>Sprint 6</i> | Notificar queja en <i>Twitter</i> . Manual del usuario de la aplicación móvil: <i>TwTaxi</i> . Manual del usuario de la aplicación web: Administrador <i>TwTaxi</i> . |

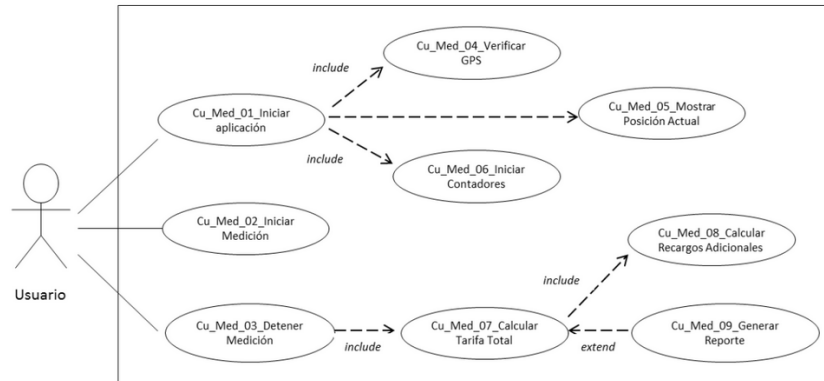


Figura 2. Diagrama de casos de uso para el módulo de medición

2.4. UML para el modelado ágil

Si bien las metodologías ágiles se centran en la comunicación entre el cliente y el equipo de desarrollo como criterio de éxito de un proyecto [21] y no enfatizan en la documentación, ello no implica que el uso de herramientas formales de modelado estén excluidas; por el contrario, pueden asegurar la calidad y mantenibilidad de una aplicación al no sacrificar las buenas prácticas del desarrollo de software.

En este trabajo se utilizaron diagramas de actividades para identificar las tareas del taxímetro y el flujo de datos entre ellas, los diagramas de casos de uso combinados con la descripción de las historias de usuario como una forma ágil de documentación (Figura 2), diagramas de clases y paquetes para agrupar la funcionalidad y diagramas de secuencia para modelar el flujo de eventos desde que se inicia el taxímetro hasta que se envía la notificación a la red social *Twitter*. Aquí solo se presenta el diagrama de paquetes de la aplicación (Figura 3); los diagramas completos se pueden consultar en [25].

3. Resultados

Con el desarrollo de este proyecto se implementó una aplicación móvil para controlar el cobro de la tarifa de taxi en la ciudad de Bogotá D.C., conforme a la normatividad vigente y haciendo uso de la red social *Twitter* como medio de denuncia, pero también se documentó la experiencia práctica del uso de una metodología ágil para el desarrollo de aplicaciones móviles y el empleo de la estadística como forma de validación de los resultados.

3.1. Taxímetro móvil – TwTaxi

Se implementó un taxímetro móvil sobre el sistema operativo *Android* (Figura 4) con las siguientes funcionalidades: a) Cargar las tarifas al iniciar el taxímetro y actualizar periódicamente las tarifas vigentes para la ciudad de Bogotá D.C. b) Calcular la localización geográfica del móvil mediante coordenadas espaciales y medir el recorrido con respecto al tiempo y la distancia, c) Calcular

el costo total de la carrera con la opción de ingresar cargos adicionales; d) Notificar cada vez que hay un nuevo modelo de tarifa, e) Permitir el envío del reporte del recorrido a *Twitter*.

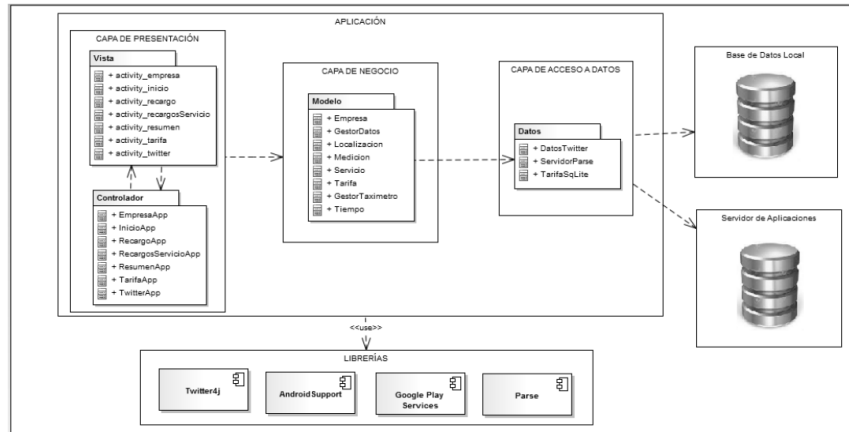


Figura 3. Diagrama de paquetes del taxímetro



Figura 4. Interfaz del taxímetro móvil desarrollado

La aplicación móvil se construyó utilizando el patrón MVC [26] sobre una arquitectura en tres capas (presentación, lógica y persistencia) [27]. Se utilizaron las siguientes tecnologías: a) Internet inalámbrico b) *Android* versión 4.4 *KitKat* y *Java Standard Edition* versión 8 c) *Justinmind* versión 6.4 d) *AndroidAsset Studio* e) *Google Maps* f) *Eclipse Luna Service Release 2* versión 4.4.2 g) *BizagiModeler* h) *Enterprise Architect* i) *Twitter4j* j) *AndroidSupport v7 appcompat* k) *BackEndParse* versión 1.7.1 l) *SQLite*. Se escogió *Android* versión 4.4 *Kit kat* como sistema operativo

Tabla IV. Herramientas de software utilizadas en la implementación del taxímetro

| CAPA | Característica | Herramienta Utilizada |
|---------------------|---|--|
| Presentación | Permitió la comunicación de la aplicación móvil con otras tecnologías. | Internet inalámbrico. |
| | Lenguaje de Programación. | <i>Android</i> versión 4.4 <i>KitKat</i> y Java <i>Standard Edition</i> versión 8. |
| | Herramienta para crear prototipos de interfaz. | <i>Justinmind</i> versión 6.4. |
| | Herramienta que permite crear componentes gráficos. | <i>AndroidAsset Studio</i> . |
| Negocio | Librería utilizada para manipular y utilizar los mapas de Google. | <i>Google Maps</i> . |
| | Entorno de desarrollo y compilación. | <i>Eclipse Luna Service Release 2</i> versión 4.4.2. |
| | Herramienta utilizada para el análisis y diseño de procesos. | <i>BizagiModeler</i> . |
| | Herramienta utilizada para el análisis y diseño de la aplicación. | <i>Enterprise Architect</i> . |
| | Librería que permite la interacción de una aplicación móvil con <i>Twitter</i> . | <i>Twitter4j</i> . |
| Persistencia | Librería utilizada para administrar la compatibilidad de las diferentes versiones de <i>Android</i> . | <i>AndroidSupport v7 appcompat</i> . |
| | Persistencia de Datos en la nube | <i>BackEndParse</i> versión 1.7.1. |
| | Persistencia de Datos local. | <i>SQLite</i> . |

y *Eclipse Luna Service Release 2* versión 4.4.2 como IDE. Para el desarrollo y pruebas de la aplicación se utilizó: un portátil DELL procesador *intelcore i5*, una *Tablet Samsung GalaxyTab4*, *Android 4.4.2* y un celular *Huawei Y511 Android 4.4*. En la Tabla IV se resume el uso de las herramientas tecnológicas por capas.

3.2. Validación

Una de las razones que justificó la utilización de la metodología ágil para el desarrollo del proyecto fue la restricción de tiempo. Sin embargo, ágil no implica dejar de lado el uso disciplinado de una metodología ni sacrificar los estándares de calidad en el proceso. Tal como lo afirma Humhrey [28], para obtener un producto de calidad se debe seguir un proceso de calidad.

La estrategia adoptada para asegurar la calidad de software durante el desarrollo del proyecto fue una combinación de: a) revisión e inspección de los artefactos desarrollados en cada Sprint, pues es la mejor estrategia para identificar y remover defectos antes de las pruebas; b) pruebas unitarias y pruebas del sistema de acuerdo con los lineamientos de Sommerville [27] para validar los requerimientos definidos en las Historias de Usuario y c) validación estadística aplicando Montgomery, para certificar la confiabilidad de la medición del taxímetro.

En este artículo se presenta el resultado de la validación estadística por considerarla de especial interés en un proceso de pruebas de software, en el que dadas las mismas entradas (hora del servicio, distancia recorrida, tarifa) es posible encontrar diferentes resultados, debido por un lado, a la tecnología de GPS que incorporan los dispositivos móviles y que se ve afectada por condiciones espaciales, de comunicación y de interferencia, y por otro, a condiciones de movilidad en diferentes horas del día. El proceso de validación estadística permitió establecer la métrica de confiabilidad del taxímetro para una combinación dada de diferentes escenarios.

3.2.1. Metodología

Para validar la confiabilidad de la medición del taxímetro se siguieron las pautas que propone Montgomery [29] las cuales proporcionan una adecuada planificación en el diseño de experimentos.

Las etapas que se mencionan a continuación se ejecutaron en forma secuencial:

- **Identificación y exposición del problema:** El GPS, como instrumento de medida, en algunas ocasiones suministra datos imprecisos e inexactos; en la mayoría de los casos, estas situaciones se presentan por interrupciones en el envío y recepción de señales entre el GPS del móvil y el satélite encargado de recibir las coordenadas del dispositivo móvil.
- **Elección de los factores :** Los factores que alteraron e influyeron en el desempeño del sistema, fueron: a) Factor constante: Para realizar las medidas se tomó de referencia siempre el mismo taxímetro como instrumento de referencia y como instrumento de medida siempre se tomó el mismo teléfono celular. b) Factor variable: Los días y zonas fueron los factores que se permitieron variar durante el experimento. En el mes de julio se tomaron los datos los días comprendidos entre el 13 y el 24 de julio, en el mes de agosto se tomaron los datos entre el 11 y 19 de agosto.
- **Elección de la técnica estadística :** Distribución *t-student*: esta distribución representada por una campana, modela diversos fenómenos que suceden en la naturaleza, en la investigación y en la industria. Una de las aplicaciones que más se asemejan al comportamiento de esta distribución, es el tratamiento de errores en la toma de medidas, es por ello que se escogió esta técnica para validar el prototipo. Además, el tamaño de muestra, junto con el uso de la media y varianza muestral, hacen que se pueda determinar un intervalo de confianza para la aplicación.

3.2.2. Materiales, desarrollo y resultado del experimento

Los datos se tomaron con un celular Huawei Y511 Android 4.4 con 4GB de Internet. Para tomar los datos se siguieron los siguientes pasos:

- Se verificó que el dispositivo móvil tuviera conexión a Internet.
- Se abrió la aplicación segundos antes de subir al taxi, para que el sistema ubicara el dispositivo y cargara el mapa.
- Luego de estar en el taxi, se iniciaron al mismo tiempo: el instrumento de referencia (taxímetro) y el instrumento experimental (aplicación).
- Al llegar al lugar de destino se detuvieron al mismo tiempo: el taxímetro y la aplicación.
- Una vez se finalizó el recorrido se registraron las unidades que marcaba la aplicación y las que marcaba el taxímetro.
- Luego de realizar 50 muestras se encontró que las unidades registradas por la aplicación versus las registradas por el taxímetro diferían en -2 unidades promedio con una desviación estándar de 1,39 unidades (Figura 5 en el apéndice). Un tamaño de muestra igual a 50 se considera aceptable, desde el punto de vista económico y logístico [29].

Intervalo de confianza

El intervalo de confianza N de un instrumento ésta determinado por: la media muestral (x), la desviación estándar (s), el tamaño de la muestra (n) y por una constante de cobertura (t) llamada *T-Student*. Esta constante se saca a partir de: el nivel de confianza que se quiere, por lo general del 95 % y el número de grados de libertad.

$$N = x' \pm t \times \frac{s}{\sqrt{n}}$$

Dado que el tamaño de la muestra fue 50, los grados de libertad son 49 y el nivel de confianza el 95 %. Se obtuvo de una tabla de la distribución *T-student* una constante de cobertura igual a: 2,096. Reemplazando la constante T-Student, la media muestral, la desviación estándar y el tamaño de la muestra en la ecuación anterior se tiene un intervalo de confianza entre -2,39 unidades y -1,61 unidades. Es decir, para una confianza del 95 %, se obtuvo que la aplicación registró entre 1,61 a 2,39 unidades menos que el taxímetro real.

4. Conclusiones

El uso masivo de dispositivos móviles y de teléfonos “inteligentes” ha generado una gran demanda de aplicaciones de software en diversos campos de aplicación. El desarrollo de aplicaciones móviles debe considerar ciertas características de hardware y software como el uso de menos interfaces físicas y más interfaces gráficas para la interacción, uso limitado de memoria, almacenamiento y procesamiento; desarrollo para múltiples plataformas como Android, BlackBerry, iPhone/iPad; y procesos de despliegue y mantenimiento flexibles. Hoy en día existen varias herramientas que consideran estas características y que además permiten integrar capacidades de software, hardware y conectividad para dar respuesta rápida a la gran demanda de aplicaciones, y es aquí donde las metodologías ágiles aportan gran valor en el desarrollo.

En este trabajo se ha mostrado el uso la metodología ágil *Scrum* para gestionar eficientemente el desarrollo del taxímetro mediante la definición de *sprints* en los que se implementaron las historias de usuario de manera iterativa e incremental. La metodología facilitó el manejo de los cambios en la funcionalidad ya que algunas de ellas se modificaron, otras se crearon e incluso, algunas que se eliminaron. Se ha mostrado también que empleando UML para el análisis y diseño se puede hacer desarrollo ágil, buscando la calidad y mantenibilidad del software.

Dado que los sistemas de software son cada vez más complejos, no solo por la misma funcionalidad sino por el entorno en que deben ejecutarse (sistemas distribuidos, en red, multiplataforma, en la nube) y por la variedad de soluciones tecnológicas y metodológicas disponibles, las pruebas de software se enfrentan al problema de una gran combinación de escenarios que requieren de una combinación de las mejores prácticas en cada caso [30]. En el proyecto presentado se utilizaron varias estrategias de validación y verificación que incluyeron: revisiones, inspecciones, pruebas de unidad, pruebas del sistema y técnicas estadísticas. La combinación de estrategias permitió detectar y corregir oportunamente los defectos en cada etapa de desarrollo, entregar un producto con menos defectos en pruebas evitando el *re-work*, reafirmando así que agilidad en el desarrollo no significa

sacrificar la calidad ni del proceso, ni del producto.

Con el uso de la estadística se pudo validar la confiabilidad del taxímetro sin requerir ejecutar innumerables casos de prueba, dado que el resultado de la medición se ve afectado por variables externas a la propia aplicación. Mediante un intervalo de confianza se pudo comprobar que la medición del taxímetro móvil es fiable en un 95 % en condiciones normales, pero con la presencia de factores de ruido (condiciones atmosféricas desfavorables, presencia de edificios muy altos y capacidad limitada de la tarjeta de red del dispositivo móvil) la señal del GPS es baja reduciendo así la exactitud y precisión del resultado.

Se espera que este taxímetro móvil, al cual hemos denominado *TwTaxi*, sea útil para los usuarios de taxi en la ciudad de Bogotá D.C. Se puede descargar gratuitamente de la tienda de aplicaciones *Aptoide*. Cabe mencionar que durante los primeros quince días de publicación la aplicación se descargó veintitrés veces y recibió comentarios positivos porque no maneja publicidad, se inicia en menos de cinco segundos y está integrada con Twitter, permitiendo así que el usuario haga pública su denuncia en caso de inconformidad en el cobro del servicio. Los modelos detallados del proyecto se encuentran en el portal web del grupo de investigación *ARQUISOFT* <http://arquisoft.udistrital.edu.co/finalizados>.

5. Trabajo Futuro

La aplicación puede ser extendida para:

- a) Hacer la implementación para otros sistemas operativos, es decir, que no solo esté disponible en *Android* sino que además se encuentre en *iOS*, *Windows Phone*, *Black Berry6*, *Symbian*, *Firefox O.S* y *Ubuntu Touch*.
- b) Buscar tecnologías alternativas al GPS. Las medidas que se obtuvieron con el GPS presentaban algunas veces variaciones con respecto a las del taxímetro real en condiciones atmosféricas desfavorables, presencia de edificios muy altos y capacidad limitada de la tarjeta de red del dispositivo móvil. Aunque esta diferencia no fue significativa en las pruebas realizadas, se pueden buscar otras tecnologías que reduzcan el margen de error en la medición, por ejemplo *GLONASS* [31], un complemento del GPS para mejorar la precisión y que ya viene incorporado en algunos celulares de alta gama.
- c) A partir de la información recolectada en el servidor *Parse* se puede evaluar el grado de satisfacción y conformidad por parte del usuario con relación al servicio prestado.
- d) Evaluar nuevas prácticas y estrategias de pruebas para el desarrollo ágil con el fin de mejorar la velocidad y efectividad de las mismas, tomando como base el trabajo de Tulasi y Mani [32].
- e) Evaluar el impacto de metodologías no ágiles para el desarrollo de aplicaciones móviles que consideren aspectos de calidad, restricciones de tiempo, integración de múltiples plataformas tecnológicas y agilidad en el desarrollo, con el fin de evaluar ventajas y desventajas frente a las metodologías ágiles.

Referencias

- [1] N. Amanquah and O. T. Eporwei, "Rapid application development for mobile terminals". in *2009 2nd International Conference on Adaptive Science & Technology (ICAST)*, 2009, pp. 410–417.
- [2] C.-C. Teng and R. Helps, "Mobile Application Development Essential New Directions for IT". in *IEEE*, 2010, pp. 471–475.
- [3] T. Vithani and A. Kumar, "Presentation 5. A comprehensive mobile application development and testing lifecycle". in *2014 IT Professional Conference*, 2014, pp. 1–3.
- [4] D. Sambasivan, N. John, S. Udayakumar, and R. Gupta, "Generic framework for mobile application development". in *2011 Second Asian Himalayas International Conference on Internet (AH-ICI)*, 2011, pp. 1–5.
- [5] Waze, Aplicación de mapas, tráfico y navegación gratuita, basada en la comunidad. [En línea]. Disponible en: <https://www.waze.com/es-419>. [Tomado el: 30-Nov-2015].
- [6] Sitp, "Muévete en el SITP con Moovit". [En línea]. Disponible en: http://www.sitp.gov.co/publicaciones/muevete_en_el_sitp_con_moovit_pub. [Tomado el: 30-Nov-2015].
- [7] Tappsi, "Tappsi - Taxi Seguro - Aplicaciones Android en Google Play". [En línea]. Disponible en: https://play.google.com/store/apps/details?id=com.tappsi.passenger.android&hl=es_419. [Tomado el: 30-Nov-2015].
- [8] Uber, "Uber - Aplicaciones Android en Google Play". [En línea]. Disponible en: https://play.google.com/store/apps/details?id=com.ubercab&hl=es_419. [Tomado el: 30-Nov-2015].
- [9] Play Google, "Taxímetro GPS - Aplicaciones Android en Google Play". [En línea]. Disponible en: https://play.google.com/store/apps/details?id=com.seeit.android.taximeter&hl=es_419. [Tomado el: 30-Nov-2015].
- [10] Play Google, "Bici-Guia - Aplicaciones Android en Google Play". [En línea]. Disponible en: https://play.google.com/store/apps/details?id=com.lacreativeria.taxiapp&hl=es_419. [Tomado el 30-Nov-2015].
- [11] A. Cardenas, "Hay cerca de 675 taxis por cada mil habitantes". *Diario ADN*, Bogotá D.C., p. 1,9, Aug-2012
- [12] M. Reyes, "Noticias Radio Ver". p. 1, Aug-2014.
- [13] "Global Positioning System: Signals, Measurements, and Performance (Revised Second Edition): Pratap Misra, Per Enge: 9780970954428: Amazon.com: Books". [En línea]. Disponible en: http://www.amazon.com/Global-Positioning-System-Measurements-Performance/dp/0970954425/ref=pd_sim_14_1?ie=UTF8&dpID=51BOJdeU9JL&dpSrc=sims&preST=.AC.UL160.SR112%2C160.&r efRID=0TXK4C2MCHQV6QQY7T53. [Tomado el: 03-Dec-2015].
- [14] D. Cuadrado, "Las pruebas del nuevo taxímetro con GPS obtienen buenas notas". *Autopista.es*, Dec-2000.
- [15] L. Creativeria, "Taxiando - Aplicaciones Android en Google PlayNo Title". [En línea]. Disponible en: https://play.google.com/store/apps/details?id=com.lacreativeria.taxiapp&hl=es_419. [Tomado el: 08-Dec-2015].
- [16] Secretaría Distrital de Movilidad, "DECRETO 400 DE 2014". in *Registro Distrital 5439 de 2014*, Bogotá D.C. 2014.
- [17] Alcaldía Mayor de Bogotá, "Decreto No. 237 de 2006". 2006.
- [18] V. autores, "NTC 3679. TAXÍMETROS ELECTRÓNICOS". ICONTEC.
- [19] H. Higuera, S.R., Ramírez, M.E., y Arguello, "Prototipo de Práctica, herramienta software orientado a dispositivos móviles para apoyar la práctica médica en el área de la práctica ortodoncia," *Ingeniería*, vol. 16, no. No.1, pp. 36–49, 2011.
- [20] "Scrum Methodology". [En línea]. Disponible en: <http://scrummethodology.com/>. [Tomado el: 02-Dec-2015].
- [21] "Manifiesto por el Desarrollo Ágil de Software". [En línea]. Disponible en: <http://agilemanifesto.org/iso/es/>. [Tomado el: 02-Dec- 2015].
- [22] "iceScrum, Open Source Scrum & Agile project management tool". [En línea]. Disponible en: <https://www.icescrum.com/>. [Tomado el: 07-Dec-2015].
- [23] M. Silvia Tabares and J. D. Barrera, Andrés Felipe Arroyave, Juan David Pineda, "Un método para la trazabilidad de requisitos en el proceso unificado de desarrollo". *EIA*, pp. 69–82, 2007.
- [24] J. Conejero and J. Hernández, "Analysis of Crosscutting Features". *ACM*, pp. 3–10, 2008.
- [25] A. Babativa and P. Briceño, "Modelos funcionales y estructurales TwTaxi". [En línea]. Disponible en: <http://arquisoft.udistrital.edu.co/finalizados>. [Tomado el: 07-Dec-2015].
- [26] F. A. Amo, L. M. Normand, and F. J. S. Pérez, *Introducción a la ingeniería del software*. Delta Publicaciones, 2005.
- [27] I. Sommerville, *Software Engineering*. 2011.
- [28] W. S. Humphrey, *Introduction to the Team Software Process*. Massachusetts: Addison Wesley, 2000.

- [29] D. C. Montgomery, *Diseño y análisis de experimentos*. México: LIMUSA WILEY, 2014.
- [30] C. Nie and H. Leung, "A survey of combinatorial testing". *ACM Comput. Surv.*, vol. 43, no. 2, pp. 1–29, 2011.
- [31] C. Hackman, S. M. Byram, V. J. Slabinski, J. C. Tracey, U. States, and N. Observatory, "USNO GPS / GLONASS PNT Products : Overview , and GPS + GLONASS vs GLONASS Only PPP Accuracy". pp. 793–803, 2007.
- [32] T. Anand and V. S. Mani, "Practices to make agile test teams effective : challenges and solutions". pp. 7–11, 2015.

Apéndice: muestras tomadas para validación

La Figura 5 muestra los resultados que se obtuvieron al realizar las pruebas, donde:

Unidades Taxímetro: Unidades registradas por el taxímetro del vehículo.
Unidades TwTaxi: Unidades registradas por la aplicación TwTaxi.

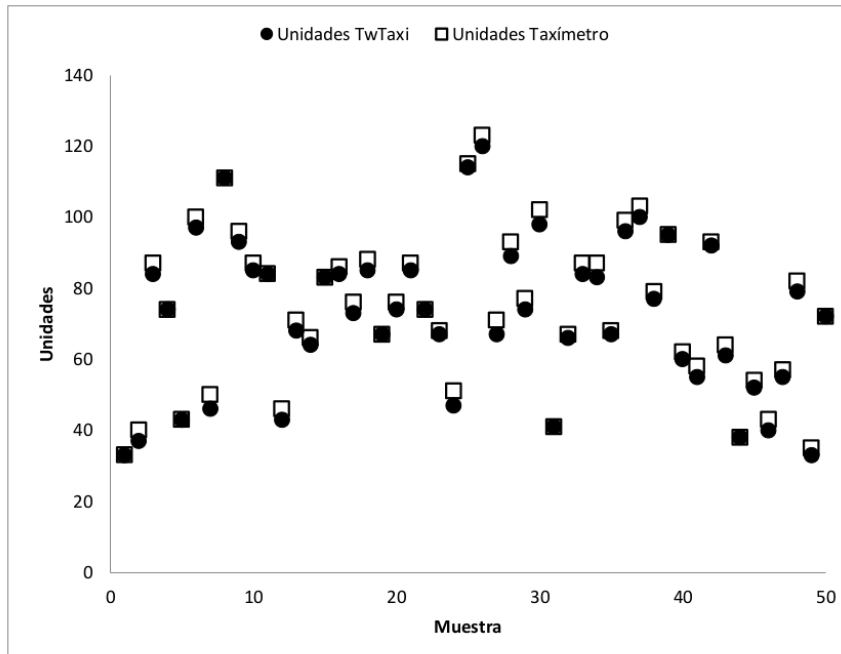


Figura 5. Unidades registradas por TwTaxi versus Taxímetro real

Angélica Babativa.

Ingeniera de sistemas, Universidad Distrital Francisco José de Caldas; estudiante Especialización en Proyectos Informáticos, Universidad Distrital Francisco José de Caldas; analista especializado en Banco Av Villas; sus intereses son las bases de datos y aplicaciones móviles. Correo electrónico: ambabativag@correo.udistrital.edu.co

Paula Briceño.

Ingeniera de sistemas, Universidad Distrital Francisco José de Caldas; analista Técnica en la Empresa TGO Ltda. para el Banco de Bogotá; sus intereses son las bases de datos, aplicaciones móviles, desarrollo de aplicaciones Web. Correo electrónico: pbricenon@correo.udistrital.edu.co

Consuelo Nieto.

Ingeniera de sistemas, Universidad Nacional de Colombia; especialista en Transmisión de Datos, Cámara Argentina de Telecomunicaciones; magíster en Ingeniería de Sistemas y Computación, Universidad de los Andes; docente de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Correo electrónico: acnietol@udistrital.edu.co

Omar Salazar.

Ingeniero Electrónico, Universidad Distrital Francisco José de Caldas; magíster en Ingeniería Industrial, Universidad Distrital Francisco José de Caldas; magíster en Ciencias Matemáticas, Universidad Nacional de Colombia; docente de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Correo electrónico: osalazarm@correo.udistrital.edu.co

Artículo de investigación

Análisis Termogravimétrico y Estudio Cinético de la Pirólisis de Residuos Sólidos Veterinarios

Thermogravimetric Analysis and Kinetic Study on Pyrolysis of Veterinarian Solid Waste

Andrés Felipe Rojas González¹, Laura María Aranzazu Ríos²

¹Grupo de Investigación Aprovechamiento de Residuos, Departamento de Ingeniería Química, Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales, Manizales, Colombia. correspondence email: anfrojasgo@unal.edu.co,

²Jefe de Control de Calidad en la Planta de Alcoholes Sulfatados en la empresa Químicos del Cauca, Cauca, Colombia.

Recibido: 19-04-2016. Modificado: 18-08-2016. Aceptado: 01-09-2016

Resumen

Contexto: Los residuos institucionales de centros hospitalarios se pueden clasificar en residuos procedentes de instituciones de salud para la atención humana y para la atención de animales, estas últimas comúnmente llamadas veterinarias. En general estos residuos son peligrosos, por lo cual su disposición final es a través de la incineración. Dado que la mayoría son residuos orgánicos se puede aprovechar su poder energético en procesos de combustión o pirólisis. Este trabajo se motivó debido a que en la literatura no se encuentran artículos de cinética de pirólisis de residuos de veterinarias, enfocándose solo en residuos de hospitales de atención humana.

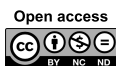
Método: Se caracterizó y estudió la cinética de pirólisis, por análisis termogravimétrico, de seis principales residuos veterinarios (gasas, hisopos, algodón, jeringas plásticas, pelo, uñas). La caracterización se realiza por análisis inmediato, elemental y análisis termogravimétrico. Se establecen las características de reactividad y de capacidad de pirólisis. El estudio de la cinética de pirólisis se llevó a cabo mediante la determinación del triplete cinético por el método isoconversional de Starink.

Resultados: Se estableció que el índice de pirólisis aumenta con la velocidad de calentamiento y que la degradación térmica depende del tipo de material del residuo. De igual manera se encontró que la temperatura ($\Delta T = T_f - T_i$) para la descomposición térmica de los residuos veterinarios es: $\Delta T_{uñas} > \Delta T_{pelo} > \Delta T_{hisopo} > \Delta T_{gasa} > \Delta T_{algodón} > \Delta T_{jeringa}$, la energía de activación es $E_{uñas} > E_{pelo} > E_{jeringa} > E_{hisopo} > E_{gasa} > E_{algodón}$ y el orden de reacción es: $n_{pelo} > n_{uñas} > n_{hisopo} > n_{algodón} > n_{gasa} > n_{jeringa}$.

Conclusiones: Estos resultados sugieren la posibilidad de aprovechar los residuos veterinarios para la generación de energía, proporcionando una alternativa de desarrollo energético sostenible a ciudades en continuo crecimiento, desde el punto de vista energético y ambiental.

Palabras clave: Índice de pirólisis, método de Starink, residuos veterinarios, termogravimetría, triplete cinético.

Idioma: Español



Citación: A.F. Rojas, L.M. Aranzazu, "Análisis Termogravimétrico y Estudio Cinético de la Pirólisis de Residuos Sólidos Veterinarios," INGENIERÍA, vol. 21, no. 3, pp. 276-289, 2016.

© Los autores; titular de derechos de reproducción Universidad Distrital Francisco José de Caldas. En línea DOI: <http://dx.doi.org/10.14483/udistrital.jour.reveng.2016.3.a02>

Abstract

Context: Institutional waste from clinical centers can be classified as those coming from health institutions dedicated to human attention and those coming from centers for animal veterinary care. The latter are mainly hazardous wastes, hence their disposal requires incineration. Most of such waste is organic, and it is possible, therefore, to take advantage of their energetic power in combustion or pyrolysis processes. This work is motivated because no literature was found on the pyrolysis kinetics veterinary waste, as this kind of studies are mainly focused on hospital waste of human health care .

Method: The kinetics of pyrolysis is characterized and studied by means of thermogravimetric analysis of 6 major veterinary waste (gauze, cotton swabs, cotton, nails, hair, plastic syringes). The characterization is performed by proximate and elemental analysis, and thermogravimetric analysis. Reactivity characteristics and pyrolytic capability of wastes are established. The kinetics study on pyrolysis was carried out by determining the kinetic triplet by isoconversional Starink method.

Results: It was established that the pyrolysis index increases with the heating rate and that the thermal degradation depends on the material type of the waste. Similarly, it was found that the temperature ($\Delta T = T_f - T_i$) for the thermal decomposition of veterinary waste is: $\Delta T_{nails} > \Delta T_{hair} > \Delta T_{cotton\ swabs} > \Delta T_{gauze} > \Delta T_{cotton} > \Delta T_{plastic\ syringes}$; the activation energy is $E_{nails} > E_{hair} > E_{plastic\ syringes} > E_{cotton\ swabs} > E_{gauze} > E_{cotton}$, and the reaction order is: $n_{hair} > n_{nails} > n_{cotton\ swabs} > n_{cotton} > n_{gauze} > n_{plastic\ syringes}$.

Conclusions: These results suggest the possibility of using veterinary wastes for power generation, providing an alternative for sustainable energy development to cities in continuous growth, from both, energetic and environmental points of view.

Keywords: kinetic triplet, pyrolysis index, Starink method, thermogravimetry, veterinary wastes.

1. Introducción

La problemática en el manejo (recolección, transporte, almacenamiento y disposición final) de los desechos hospitalarios que enfrenta la humanidad, proviene del crecimiento exponencial de la población y el afán en alcanzar la industrialización de los países. El inadecuado manejo de los residuos puede generar daños físicos e infecciones graves en las personas que trabajan en hospitales, en pacientes, en recicladores y en la comunidad en general, al igual que en los animales, que de alguna manera tiene contacto con estos residuos [1]. Entre los residuos hospitalarios se encuentran: i) los residuos provenientes de instituciones hospitalarias (hospitales, clínicas médicas, centros de salud, ancianatos y clínicas de reposo) que atienden al ser humano, y ii) los residuos procedentes de centros veterinarios, que atienden toda clase de animales [2]. Los residuos hospitalarios o residuos médicos se definen como cualquier residuo sólido generado en el diagnóstico, tratamiento o inmunización de seres humanos o animales, al igual que los que resultan de investigaciones, en la producción o ensayos de productos biológicos [2].

Los residuos veterinarios se generan por el mantenimiento estético y médico de animales. Estos residuos dependen del tipo de veterinaria, ya que existen veterinarias rurales donde se atienden animales como perros, gatos, conejos, vacas, caballos, cerdos, gallinas, patos, burros, ovejas, cabras, entre otros, y las veterinarias urbanas dedicadas a la atención de mascotas como perros, gatos, pája-

ros y hámsteres, entre los más comunes. En los objetos comúnmente encontrados en los residuos veterinarios se encuentran: tubos para transfusión, colectores de muestra para orina, guantes médicos, tapabocas, catéteres, algodones, gasas, toallas de papel, orina, piel, músculos, sabanas, ropa, medicamentos, envases plásticos y de vidrio y cajas de medicamentos [3] [4].

Tales residuos se han caracterizado por análisis termogravimétrico, para estudiar su comportamiento térmico en atmósfera oxidante (combustión) [5] [6] [7] y en atmósfera inerte (pirólisis) [4] [8]. De igual manera se ha evaluado la capacidad de reducción de volumen y de peligrosidad de los residuos, y la recuperabilidad de la energía contenida en ellos [9]. El comportamiento térmico en combustión y pirólisis, determinado por medio de un estudio cinético, generalmente se lleva a cabo por análisis termogravimétrico en atmósfera de nitrógeno (pirólisis) [10] y en atmósfera de aire (combustión) [7], bajo condiciones no isotérmicas. Esos estudios cinéticos se centran en la determinación del triplete cinético, el cual está constituido por los parámetros de energía de activación, orden de reacción y factor pre-exponencial/factor de frecuencia.

De todo lo anterior y como se sugiere en la literatura, es importante realizar investigaciones que lleven a los ingenieros a formular modelos energéticos diversificados, basados en el desarrollo de técnicas y tecnología más eficientes, lo cual se logra con el conocimiento en el comportamiento energéticos de los materiales [11], y buscando fuentes alternas de energía, que sean limpias y renovables, como los residuos de las clínicas veterinarias.

El objetivo de este trabajo es caracterizar y estudiar la cinética de pirólisis, por análisis termogravimétrico, de seis residuos (algodón, gasas, cuerpo de las jeringas, hisopos, pelo y uñas) de las clínicas y centros veterinarios urbanos de la ciudad de Manizales. La caracterización se realiza por medio del análisis inmediato, elemental y análisis termogravimétrico, el cual se realiza en atmósfera inerte y a cuatro velocidades de calentamiento (5, 10, 20 y 40°C/min). A partir de los perfiles de pirólisis se obtiene información de las temperaturas de inicio, máxima y final de degradación, la velocidad máxima de pérdida de peso y delta de temperatura de degradación, y se establecen las características de reactividad por medio de las temperaturas características y de capacidad de pirólisis. El estudio de la cinética de pirólisis se llevó a cabo mediante la determinación del triplete cinético por medio del método isoconvensional de Starink [10] [12].

2. Materiales y métodos

2.1. Materiales

Los residuos sólidos veterinarios se adquirieron de tres centros veterinarios, de veinticuatro existentes en la ciudad de Manizales. Estos residuos se recogieron en el mismo periodo de tiempo en las tres veterinarias, con un promedio en peso de 20 kg en cada una de ellas. Las tres veterinarias se escogieron por su importancia y cobertura de la ciudad. Una vez obtenidos los residuos de dichos centros, se identificaron los seis componentes mayoritarios, los cuales fueron: algodón, gasa, hisopo, jeringas, pelo y uñas. Adicionalmente a estas componentes por separado, también se analizó una muestra conocida como mezcla, la cual consiste en una muestra representativa de los residuos obtenidos en los tres centros veterinarios. Posterior a la identificación de los componentes

individuales de los residuos veterinarios, se procedió a separarlos por tipos, pesarlos y posteriormente se redujeron de tamaño por corte y trituración, hasta un tamaño de partícula entre 0.1 y 1 mm. Para los respectivos análisis de cada uno de los residuos, se tomó una muestra triturada de 6g.

2.2. Caracterización fisicoquímica de los residuos

Los seis residuos se caracterización de acuerdo a las normas ASTM para análisis inmediato y elemental. En el análisis inmediato se determina el contenido de humedad total (ASTM D 3302), cenizas (ASTM D 7582), materia volátil (ASTM D 7582) y carbono fijo (ASTM D 3172). Este análisis se llevó a cabo en un analizador termogravimétrico marca LECO TGA-601. El poder calorífico superior (PCS) e inferior (PCI) se establece de acuerdo a la norma ASTM D 5865, empleando una bomba calorimétrica marca LECO AC 350. En el análisis elemental se cuantifica el contenido de carbono (ASTM D 5373), hidrógeno (ASTM D 5373), nitrógeno (ASTM D 5373), azufre (ASTM D 4239) y oxígeno (ASTM D 5373) de los residuos. La determinación de los elementos C, H y N se realizó en un analizador LECO CHN-268, el azufre se obtuvo en un sulfurómetro marca LECO S-632 y el oxígeno se calculó por diferencia incluido el contenido de cenizas.

2.3. Caracterización termogravimétrica de los residuos

La caracterización termogravimétrica se lleva a cabo en un analizador termogravimétrico Q600 simultáneo DSC-TGA TA Instrument. Con este análisis se obtuvieron los perfiles de pirólisis de cada residuo a cuatro velocidades de calentamiento (5, 10, 20 y 40°C/min), calentando desde temperatura ambiente hasta 800°C en atmósfera inerte, con un flujo de nitrógeno constante de 100 mL/min, y una muestra entre 10 y 12 mg, que se alimentó al crisol de aluminio. A partir de los datos entregados por el equipo, empleando termogravimetría dinámica o termogravimetría no isotérmica, se obtuvieron las gráficas de peso remanente y velocidad de pérdida de peso en función de la temperatura, para cada velocidad de calentamiento a cada uno de los residuos. De las curvas de pérdida de peso (TG) y de velocidad de pérdida de peso (DTG), se obtuvieron las temperaturas características (temperatura inicial, máxima y final de degradación), la velocidad máxima de pérdida de peso y se determinó el índice de pirólisis. Este último parámetro es un índice de comparación entre diferentes materiales que expresa la reactividad o capacidad de la materia a ser pirolizada. De tal manera que un bajo valor de este índice indica que el material tiene una menor reactividad o capacidad de ser pirolizado, que aquel que muestra un mayor valor. Este índice depende de variables como tamaño de partículas y características físicas y químicas del residuo, que afectan la transferencia de calor y masa, lo cual se establece indirectamente con las temperaturas características y la conversión. El índice de pirolisis se calcula por medio de la siguiente ecuación 3.

$$I_p = \left(\frac{d\alpha}{dt} \right)_{max} \cdot \frac{\alpha_{\Delta T}}{T_m \cdot T_i \cdot T_f} \quad (1)$$

Donde I_p es el índice de pirólisis ($\%^2 \cdot /(\text{s} \cdot \text{C}^3)$), $(d\alpha/dt)_{max}$ ($\%/s$) la máxima velocidad de pérdida de peso, T_m ($^{\circ}\text{C}$) la temperatura a la máxima velocidad de pérdida de peso, T_i la temperatura inicial de degradación y T_f la temperatura final de degradación. Las temperaturas inicial y final de degradación se obtienen a conversiones de 5 y 95 % respectivamente. T_m se obtiene a $(d\alpha/dt)_{max}$ y $\alpha_{\Delta T}$ ($\%$) es la diferencia de conversiones al inicio y al final de la etapa de degradación y tiene un

valor de 90 %, el cual es fijado por Deng et al. [3].

De la información proporcionada por el análisis termogravimétrico se determinaron otros parámetros de pirólisis como el tiempo y la diferencia de temperatura para que el residuo se degrade desde un 5 a un 95 %. Estos parámetros indican qué residuo requiere un mayor tiempo de residencia en el proceso de pirólisis.

2.4. Estudio cinético de los residuos

El método isoconvensional de Starink para la determinación del triplete cinético (energía de activación (E), factor de frecuencia (A), y orden de reacción (n)) de la degradación térmica de los residuos sólidos, es una aproximación desarrollada a partir de la combinación de los métodos de Flynn-Wall-Ozawa (FWO) [13] y Kissinger-Akahira-Sunose (KAS) [14], cuyas expresiones matemáticas se muestran en las ecuaciones 2 y 3, respectivamente.

$$\ln \beta_i = \left[\frac{AE}{RG(\alpha)} \right] - 2,315 - 0,4567 \frac{E}{RT} = C_0 - 0,4567 \frac{E}{RT} \quad (2)$$

$$\ln \left(\frac{\beta_i}{T_{pi}^2} \right) = \ln \left(\frac{A_k R}{E_k} \right) - \frac{E_k}{RT_{pi}} = C_k - \frac{E_k}{RT_{pi}} \quad (3)$$

El desarrollo de la ecuación de Starink se basa en el hecho que las expresiones de los métodos FWO y KAS, se pueden reescribir de una misma forma general, dada por la ecuación para la descomposición térmica en estado sólido, así [10] [12]:

$$\ln \left(\frac{\beta}{T^{1,8}} \right) = C_S - 1,0037 \frac{E}{RT} \quad (4)$$

Aquí β es la velocidad de calentamiento, R es la constante universal de los gases, C_S es una constante y T es la temperatura absoluta. Para una conversión dada la anterior ecuación se grafica, obteniendo una línea recta con pendiente $-1.0037E/R$, de la cual se calcula el valor de E . Esta ecuación, al igual que la ecuación de los métodos FWO y KAS, considerando que la velocidad de degradación es función de un término que depende de la temperatura ($k(T)$), conocido como la constante de reacción, y un término que es función de la conversión, la cual esta elevada a una potencia conocida como orden de reacción [12].

El método Starink se trabaja con la conversión del residuo, α , calculada mediante la ecuación 5, donde W_0 , W_t y W_∞ son las masas de la muestra al inicio, al tiempo t y al final de la reacción, respectivamente.

$$\alpha = \frac{W_0 - W_t}{W_0 - W_\infty} \quad (5)$$

Esta conversión se obtiene de pesos remanentes de la muestra registrados por el TGA. Con estos datos y la ecuación 4 se procede a determinar el triplete cinético, así: i) se calcula la energía de activación fijando diferentes valores de conversión (entre 0 y 1), ii) para cada valor fijo de conversión se lee la temperatura a cada una de las cuatro velocidades de calentamiento, iii) con estos datos se prepara un gráfico de $\ln(\beta/T^{1,8})$ versus $1/T$, obteniéndose una línea recta con pendiente

$-1,0037E/RT$, según la ecuación 4, de donde se calcula la energía de activación. Para determinar el orden de reacción y el factor de frecuencia, se utiliza la teoría de Avrami, también conocida como cinética de transformación de Johnson-Mehl-Avrami-Kolmogorov (JMAK), la cual describe el grado en que se transforma un material durante una cierta transformación de fase, como una función de la temperatura y el tiempo. El modelo JMAK originalmente se estableció para materiales cristalinos que cambian de fase mediante modelos cinéticos de nucleación y crecimiento, lo cual inicialmente limitaba su uso para la transformación de fase de materiales amorfos en general [15]. Sin embargo, la teoría de Avrami se ha implementado tanto para determinar órdenes de reacción en reacciones en estado sólido en sistemas isotérmicos y no isotérmicos de materiales amorfos y no amorfos, como en otras transformaciones de fase en estado sólido [16]. Una forma como se puede escribir la teoría de Avrami, considerando un modelo de orden de reacción, es por medio de la ecuación [15]:

$$\alpha = 1 - \exp\left(-\frac{k(T)}{\beta^n}\right) \quad (6)$$

Donde $k(T)$ es la constante de reacción dada por la ecuación de Arrhenius, la cual es:

$$k(T) = A \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \quad (7)$$

La constante de reacción es función de la temperatura y del factor de frecuencia o factor pre-exponencial A. Sustituyendo la ecuación 7 en la ecuación 6 y tomando logaritmos se obtiene:

$$\ln(-\ln(1 - \alpha)) = \ln A - \frac{E}{RT} - n \ln \beta \quad (8)$$

A continuación, se procede a: iv) fijar una temperatura T , v) a esta temperatura se lee la conversión para cada velocidad de calentamiento, vi) se realiza un gráfico de $\ln(-\ln(1 - \alpha))$ versus $\ln \beta$ y se obtiene una línea recta con pendiente $-n$, de donde se determina el orden de reacción y del intercepto se calcula factor de frecuencia, según la ecuación 8 [15].

3. Resultados y discusión de resultados

3.1. Caracterización fisicoquímica de los residuos

Los resultados del análisis inmediato en base seca de los residuos veterinarios se presentan en la tabla I. En esta tabla se observa que la jeringa tiene el mayor contenido de materia volátil (MV), mayor poder calorífico (PCS y PCI) y menor contenido de carbono fijo (CF), cenizas (Cz) y humedad (Hw) en base húmeda, esto se debe a que el cuerpo de la jeringa está fabricado principalmente de Poliestireno. Mientras que el hisopo presenta el menor contenido de MV, el de mayor contenido de CF y el segundo en mayor contenido de Cz (0.80 %). También se aprecia que todos los residuos presentan similares valores de PCS excepto la jeringa y la muestra denominada mezcla. El algodón se caracteriza por tener el mayor contenido de Hw. Estos resultados confirman cuán importante es trabajar en la estrategia conocida como “residuos a energía”, actualmente implementada en el área de tratamiento de residuos en general, llevando a un máximo aprovechamiento del contenido energético de ellos [17].

Tabla I. Análisis inmediato de los residuos veterinarios en base seca (porcentaje en peso)

| Muestra | Hw | C | MV | CF | PCS(kJ/kg) | PCI(kJ/kg) |
|---------|-------|------|-------|-------|------------|------------|
| Mezcla | 9.09 | 0.51 | 84.81 | 14.68 | 30077 | 27682 |
| Jeringa | 0.15 | 0.23 | 99.77 | 0.00 | 45410 | 42354 |
| Pelo | 13.21 | 0.54 | 78.80 | 20.66 | 21199 | 19273 |
| Uñas | 11.39 | 0.99 | 78.65 | 20.36 | 21741 | 19890 |
| Algodón | 23.91 | 0.54 | 87.11 | 12.35 | 21913 | 19699 |
| Hisopo | 10.03 | 0.80 | 77.38 | 21.82 | 21446 | 19990 |
| Gasa | 21.75 | 0.35 | 89.12 | 10.53 | 21774 | 19801 |

En el análisis elemental, que se muestra en la tabla II, se aprecia que el residuo de jeringas muestra el mayor contenido de carbono (C) e hidrógeno (H) y los menores contenidos de azufre (S) y oxígeno (O). Esto es debido al origen petroquímico del Poliestireno. Los residuos de jeringa y gasa no reportan contenido de nitrógeno (N) en su composición. El pelo y las uñas muestran los mayores contenidos de N, al igual que similares valores de los demás elementos, esto posiblemente se debe a que son residuos de origen animal. También se observa que el algodón, el hisopo y las gasas tienen similar análisis elemental, esto se debe a que los 3 están fabricados a base de fibra de algodón. Estos resultados complementan los análisis reportados por Deng *et al.* [3] y Zhu *et al.* [8], para residuos médicos en general.

Tabla II. Análisis elemental de los residuos veterinarios en base seca, libre de cenizas (porcentaje en peso)

| Muestra | C(%) | H(%) | N(%) | S(%) | O(%) |
|---------|-------|-------|-------|------|-------|
| Mezcla | 66.73 | 9.89 | 1.43 | 1.80 | 20.15 |
| Jeringa | 84.35 | 13.88 | 0.00 | 0.13 | 1.63 |
| Pelo | 48.26 | 6.98 | 16.24 | 5.53 | 22.99 |
| Uñas | 50.03 | 7.04 | 16.70 | 3.70 | 22.54 |
| Algodón | 45.34 | 6.58 | 1.42 | 0.12 | 46.54 |
| Hisopo | 50.63 | 6.19 | 0.20 | 0.19 | 42.79 |
| Gasa | 49.69 | 5.89 | 0.00 | 0.20 | 44.21 |

3.2. Perfiles de pirólisis de los residuos

Las curvas TG de los residuos veterinarios se muestran en la figura 1, donde en el eje de las ordenadas se ubica el porcentaje de pérdida de peso o peso remanente (%), todas normalizadas a un valor inicial de 100% para facilitar la comparación, y en el eje de las abscisas se grafica la temperatura en °C. En esta figura se observa que las temperaturas inicial y final de descomposición de todos los residuos son diferentes. Lo cual se aprecia en el cambio de pendiente de las líneas horizontales al inicio y al final de cada curva TG, respectivamente. Esto se atribuye a la diferencia en las características de pirólisis de cada uno de los residuos. En esta figura también se observa que entre 200 y 350°C los residuos de pelo, uñas e hisopos sufrieron una importante pérdida de peso de aproximadamente el 70% respecto al peso inicial, mientras que los residuos de gasa y algodón experimentan su degradación entre 300 y 400°C. Los residuos de jeringa muestran una pérdida de peso entre 410 y 470°C. A 550°C todas las muestras completaron su descomposición por pirólisis. También se aprecia que la gasa y el algodón tienen curvas de pérdida de peso similares, esto debido a la composición de la gasa en su mayoría es algodón. De igual manera se observa que el residuo

de mayor pérdida de peso fue la jeringa, la cual experimentó la degradación térmica a mayores temperaturas comparado con los otros residuos.

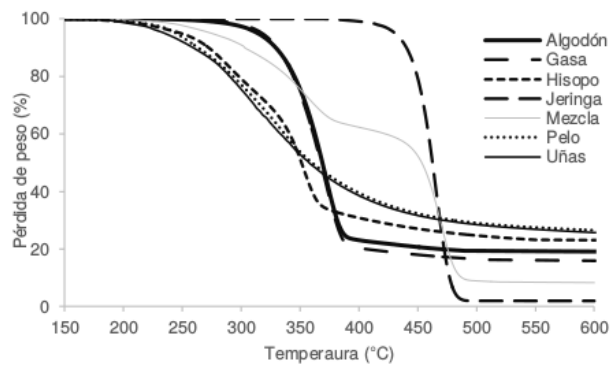


Figura 1. Curvas TG de los residuos veterinarios a 20°C/min.

Las curvas de la termogravimetría diferencial (DTG) de los residuos veterinarios se presentan en la figura 2. En esta figura se observa, entre 200 y 300°C, dos picos en las muestras de uñas, pelo y hisopo. Lo anterior puede indicar que existen dos etapas de degradación térmica, determinadas por la composición química y física individual de cada material analizado, lo cual juega un papel importante en su comportamiento en la pirólisis. Sin embargo, es importante resaltar que un mismo pico se puede deconvolucionar en varios picos que indicarían diferentes etapas en un mismo mecanismo de reacción. Los residuos de jeringa, gasa y algodón, solo muestran un pico, indicando que ellos se degradan bajo un único modelo de reacción. También se observa que las muestras de uñas y pelo, tienen comportamiento de degradación térmica similares, al igual que ocurre entre las muestras de hisopo, gasa y algodón. Esto se aprecia por las similitudes en el rango de temperatura de inicio y final de los picos, y que las curvas DTG de los residuos de gasa y algodón se encuentra superpuestas. De igual manera, se puede concluir que las muestras de uñas y pelo, se degradan con mayor facilidad, mientras que las muestras del cuerpo de la jeringa no se degradan tan fácilmente, debido a que requieren una mayor temperatura, comparado con los demás residuos. Esto concuerda con resultados reportados en la literatura para residuos médicos [3]. Respecto a la máxima velocidad de degradación, se observa que los residuos de jeringa, gasa, algodón e hisopo, experimentan en forma descendente, las mayores velocidades de degradación térmica en pirólisis de todos los residuos.

La figura 3 muestra la variación de las curvas DTG con la velocidad de calentamiento para el residuo algodón. Aquí se observa que la máxima velocidad de degradación del algodón aumenta disminuye al aumentar la velocidad de calentamiento. Además, la curva DTG se desplaza, alejándose del eje de las ordenadas con el aumento en la velocidad de calentamiento. A pesar que aquí no se muestra, este mismo comportamiento se observó para los otros residuos incluida la muestra denominada mezcla. Similares resultados fueron reportados por Slopiecka *et al.* [18] para la pirólisis de madera de álamo.

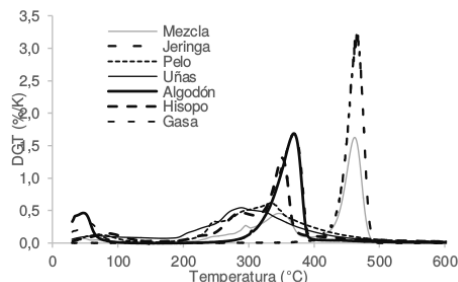


Figura 2. Curvas DTG de los residuos veterinarios a 20°C/min.

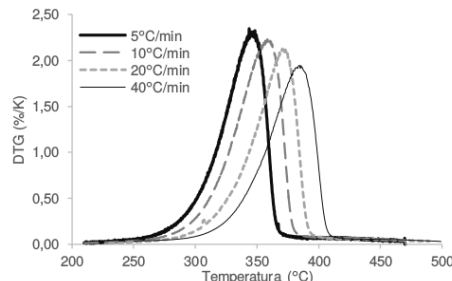


Figura 3. Variación de las curvas DTG de algodón a diferentes velocidades de calentamiento.

3.3. Temperaturas características

De las curvas obtenidas para cada residuo a las cuatro velocidades de calentamiento por la termogravimetría diferencial (DTG), se determinan las temperaturas características del perfil de pirólisis, las cuales se presentan en las figuras 4, 5 y 6, para las temperaturas T_i , T_m y T_f de degradación, respectivamente. En la figura 4 se observa que para la mayoría de los residuos la T_i aumenta con la velocidad de calentamiento. También se puede ver que, en promedio para las cuatro velocidades de calentamiento, el residuo de jeringa presenta el mayor valor de T_i (423°C), seguido por algodón (303°C), gasa (293°C), mezcla (268°C), pelo (237°C), hisopo (234°C) y uñas (217°C). De igual manera se observa que en términos generales al aumentar la velocidad de calentamiento se aprecia un incremento de las temperaturas características, que fácilmente se puede evidenciar con un desplazamiento hacia la derecha de las curvas que describen la descomposición de los residuos. Similares resultados son registrados por Zhu *et al.* [8], para papel adsorbente, algodón, aparatos plásticos de respiración y copitos de madera.

Para la temperatura máxima de pérdida de peso, que se muestra en la figura 5, se aprecia que el orden de los residuos de mayor a menor T_m es: jeringa (461°C), mezcla (435°C), algodón (365°C),

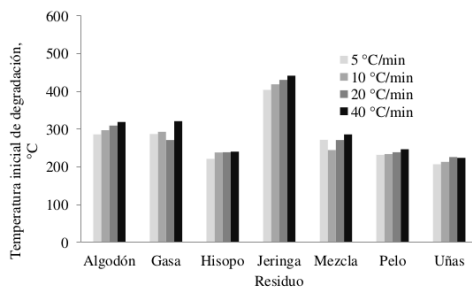


Figura 4. Variación de la temperatura inicial de degradación para residuos veterinario a diferente velocidad de calentamiento.

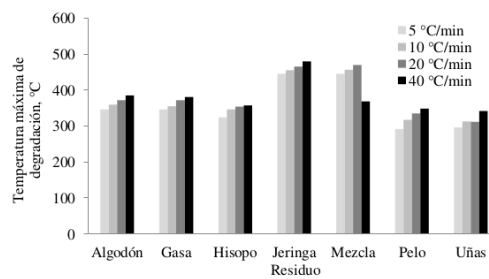


Figura 5. Variación de la temperatura máxima de degradación para los residuos veterinarios a diferente velocidad de calentamiento.

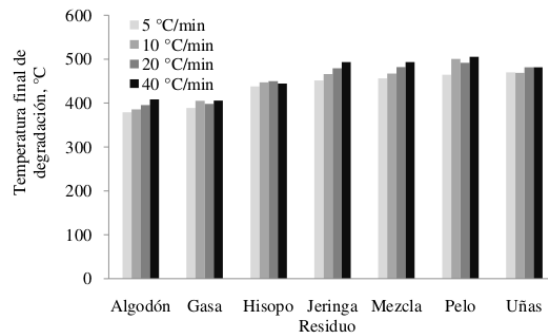


Figura 6. Variación de la temperatura final de degradación para los residuos veterinarios a diferente velocidad de calentamiento.

gasa (363°C), hisopo (345°C), pelo (323°C) y uñas (315°C). Respecto a la temperatura final de degradación (figura 6) se observa que, en promedio para las cuatro velocidades de calentamiento, la T_f mayor es para el residuo de pelo (490°C), valores similares para los residuos de jeringa (472°C), mezcla (474°C) y uñas (475°C), seguido por hisopo (444°C), gasa (399°C) y algodón (391°C). Si se toma las temperaturas T_i , y T_m como parámetros cualitativos para establecer la reactividad a la pirólisis de los residuos veterinarios, considerando el más reactivo aquel que presente el menor valor de estos parámetros, se puede decir que los tres residuos de mayor reactividad son: uñas, hisopo y pelo, y los dos de menos reactivos son: jeringa y algodón.

3.4. Índice de pirólisis

Índice de Pirólisis a diferentes velocidades de calentamiento para los 7 residuos se presentan en la tabla III.

Tabla III. Índice de Pirólisis a diferentes velocidades de calentamiento (10^{-6})

| Muestra | 5°C/min | 10°C/min | 20°C/min | 40°C/min | r^2 |
|---------|---------|----------|----------|----------|-------|
| Mezcla | 2.50 | 3.35 | 10.48 | 13.36 | 0.886 |
| Jeringa | 4.74 | 8.43 | 14.95 | 26.47 | 0.998 |
| Pelo | 1.70 | 2.65 | 5.27 | 11.18 | 0.996 |
| Uñas | 1.89 | 5.57 | 6.95 | 10.84 | 0.916 |
| Algodón | 4.21 | 7.48 | 14.66 | 24.91 | 0.993 |
| Hisopo | 3.53 | 5.86 | 11.90 | 23.37 | 0.999 |
| Gasa | 4.36 | 7.35 | 14.80 | 24.76 | 0.992 |

La última columna de la tabla es el coeficiente de correlación lineal, el cual muestra la relación existente entre el I_p y la velocidad de calentamiento. En todos los residuos se observa que el I_p aumenta con la velocidad de calentamiento en forma lineal, excepto para la mezcla que presenta un r^2 de 0.886. Al comparar el I_p a cualquier velocidad de calentamiento, los residuos con mayor capacidad a ser pirolizados son jeringa, algodón y gasa, seguidos por hisopo, mezcla, uñas y pelo. Lo anterior indica que no necesariamente los residuos que son más reactivos a la pirólisis (que inicien la pirólisis a baja temperatura), sean los que tengan la mayor capacidad a ser pirolizados.

Estos resultados son comparables con los presentados en la literatura para residuos médicos [3].

3.5. Otros parámetros de degradación

En la tabla IV se muestra los valores de otros parámetros característicos del proceso de pirólisis, obtenidos por medio del análisis termogravimétrico a diferentes velocidades de calentamiento. Estos parámetros son: $(d\alpha/dT)_m$, $(d\alpha/dT)_{1/2}$, ΔT , α_m , los cuales representan la velocidad máxima de conversión o de pérdida de peso o velocidad máxima de degradación debido a la reacción de pirólisis, la velocidad de conversión a la mitad de la altura del pico, la diferencia de temperatura para que un material se degrade desde un 5 hasta un 95 %, y la conversión para la máxima velocidad de reacción de degradación, respectivamente.

Tabla IV. Parámetros característicos de pirólisis: velocidad máxima de degradación y rango de temperatura de degradación

| Residuo | 5°C/min | | | | 10°C/min | | | | 20°C/min | | | | 40°C/min | | | |
|---------|-------------------------|-----------------------------|-----------------|-----------------|-------------------------|-----------------------------|-----------------|-----------------|-------------------------|-----------------------------|-----------------|-----------------|-------------------------|-----------------------------|-----------------|-----------------|
| | $(d\alpha/dT)_m$ %/K | $(d\alpha/dT)_{1/2}$ %/K | ΔT , °C | α_m % | $(d\alpha/dT)_m$ %/K | $(d\alpha/dT)_{1/2}$ %/K | ΔT , °C | α_m % | $(d\alpha/dT)_m$ %/K | $(d\alpha/dT)_{1/2}$ %/K | ΔT , °C | α_m % | $(d\alpha/dT)_m$ %/K | $(d\alpha/dT)_{1/2}$ %/K | ΔT , °C | α_m % |
| Jeringa | 4.13 | 2.06 | 47.63 | 76.98 | 3.76 | 1.88 | 46.99 | 68.99 | 3.34 | 1.66 | 48.77 | 59.40 | 3.16 | 1.59 | 52.08 | 61.35 |
| Algodón | 2.31 | 1.16 | 92.83 | 64.94 | 2.24 | 1.11 | 88.10 | 67.67 | 2.17 | 1.09 | 86.15 | 67.79 | 1.95 | 0.98 | 88.90 | 68.40 |
| Gasa | 2.71 | 1.36 | 101.44 | 66.80 | 2.09 | 1.04 | 111.91 | 54.54 | 2.01 | 1.01 | 126.71 | 67.78 | 1.94 | 0.97 | 84.37 | 64.72 |
| Mezcla | 1.82 | 0.91 | 184.40 | 80.36 | 1.73 | 0.87 | 222.06 | 85.77 | 1.56 | 0.78 | 210.22 | 77.36 | 1.07 | 1.04 | 207.37 | 74.65 |
| Hisopo | 1.95 | 0.98 | 216.64 | 66.47 | 1.58 | 0.79 | 208.10 | 68.62 | 1.53 | 0.77 | 211.44 | 68.33 | 1.50 | 1.25 | 203.43 | 68.63 |
| Pelo | 0.86 | 0.43 | 232.12 | 33.45 | 0.85 | 0.43 | 266.58 | 46.48 | 0.78 | 0.39 | 253.11 | 52.75 | 0.71 | 0.36 | 258.27 | 53.26 |
| Uñas | 0.89 | 0.45 | 263.11 | 42.94 | 0.80 | 0.39 | 255.97 | 44.05 | 0.72 | 0.37 | 255.00 | 40.92 | 0.70 | 0.35 | 257.40 | 43.13 |

En esta tabla se observa que, para cualquier velocidad de calentamiento, la diferencia de temperatura para que un residuo se descomponga desde un 5 a un 95 %, varía según el tipo de residuo. Por lo tanto, el orden de menor a mayor diferencia de temperatura requerida para que ocurra la degradación de los residuos veterinarios es: jeringa, algodón, gasa, mezcla, hisopo, pelo y uñas. Este mismo orden de los residuos se cumple para valores de velocidad máxima de degradación de mayor a menor. Estos resultados muestran que los residuos a base de fibra de algodón están seguidos unos de otros, al igual que ocurre con los residuos de origen animal (pelo y uñas). También se aprecia que la velocidad máxima de degradación y velocidad de conversión a la mitad de la altura del pico, disminuyen con el incremento de la velocidad de calentamiento. Mientras que la conversión para la máxima velocidad de reacción de degradación no tiene una relación directa con el aumento de la velocidad de calentamiento, dado que para algunos esta conversión aumenta (algodón, hisopo, pelo), para otros disminuye (jeringa, mezcla) y en otros no hay una tendencia clara (gasa, pelo).

3.6. Análisis cinético de los residuos

De la pendiente de la ecuación 1 se obtiene la energía de activación a una conversión fija. La variación de E con la conversión se muestra en la figura 7. En esta figura se observa que E no cambia significativamente con la conversión para los residuos de jeringa, gasa y algodón, indicando que se degradan bajo un único mecanismo de reacción. Sin embargo, la E varía poco para el hisopo, y se presentan los mayores cambios de E con la conversión para uñas y pelo. A conversiones superiores al 50 % la variación de E es más notoria, generándose un cambio de pendiente alrededor del 50 % para el pelo y de 60 % para las uñas. Este cambio de pendiente confirma que dichos residuos se degradan por medio de un mecanismo complejo de múltiples etapas y que el mecanismo de reacción no es el mismo en todo el proceso de descomposición [19], como se analizó en la figura 2. Sin embargo, se debe tener cuidado cuando se presentan más de dos picos en un diagrama DTG,

dado que un mismo pico se puede deconvolucionar en varios picos que indicarían diferentes etapas en un mismo mecanismo de reacción.

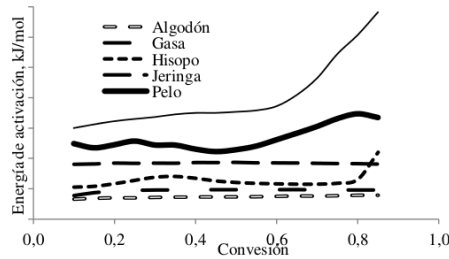


Figura 7. Variación de la energía de activación con la conversión.

Tabla V. Triplete cinético de los residuos veterinarios por el método de Starink

| Muestra | E(kJ/mol) | n | Ln A | r ² |
|---------|-----------|------|-------|----------------|
| Algodón | 172.96 | 0.78 | 31.81 | 0.9995 |
| Gasa | 173.09 | 0.86 | 31.75 | 0.9896 |
| Hisopo | 189.57 | 0.36 | 37.29 | 0.8347 |
| Jeringa | 223.26 | 1.27 | 34.53 | 0.9993 |
| Pelo | 251.01 | 0.23 | 47.54 | 0.9593 |
| Uñas | 271.12 | 0.25 | 53.43 | 0.9268 |

La energía de activación en cada residuo se promedió para el rango de conversiones entre 1 y 99 %, el factor frecuencia (Ln A) y el orden de reacción se calcularon de la pendiente y el intercepto de la ecuación (8), respectivamente. Estos resultados al igual que el coeficiente de correlación se presentan en la tabla V. La energía de activación es: $E_{uñas} > E_{pelo} > E_{jeringa} > E_{hisopo} > E_{gasa} > E_{algodón}$, esto indica que los residuos de algodón son más reactivos a la pirólisis que los residuos de uñas. El orden de reacción es: $n_{pelo} > n_{uñas} > n_{hisopo} > n_{algodón} > n_{gasa} > n_{jeringa}$. En esta tabla también se observa que los coeficientes de correlación son cercanos a la unidad, excepto para el hisopo.

4. Conclusiones

El poder calorífico para los residuos de gasa, algodón, pelo, uñas e hisopo, presenta valores muy cercanos entre ellos. Para la jeringa se encontró un valor de poder calorífico dos veces mayor en comparación con los residuos anteriores, lo cual se debe a que se encuentra hecha en su mayor parte de Poliestireno. Es por ello que para la jeringa se requiere alcanzar una mayor temperatura para poder lograr su pirólisis. Caso contrario con los residuos de algodón, gasa, hisopo, uñas y pelo pirolizan a temperaturas menores de 400°C.

El método de Starink presenta una buena correlación de las variables de seguimiento en el estudio de la pirólisis de los residuos veterinarios de algodón, jeringa, gasa, pelo, uñas y en menor medida para el hisopo. Encontrándose que, por medio de este método, los residuos de algodón son los más reactivos a la pirólisis, seguido de los residuos de gasa, hisopo, jeringa, pelo y uñas. Lo cual se establece con el orden de menor a mayor valor de la energía de activación ($E_{algodón} < E_{gasa} < E_{hisopo} < E_{jeringa} < E_{pelo} < E_{uñas}$).

El orden de reacción de los residuos veterinarios se encuentra entre 0.23 y 1.27, la energía de activación están en el rango de 172 y 272 kJ/mol y la probabilidad de colisión o factor exponencial entre 31 y 54. La validación de estos datos al igual que del modelo cinético, con miras a un modelado y escalado, será objeto de un estudio posterior.

A partir del análisis termogravimétrico se estableció que los residuos veterinarios de uñas, pelo e hisopo, se degradan mediante dos diferentes mecanismos de reacción complejos de múltiples etapas, mientras los residuos de jeringa, gasa y algodón lo realizan bajo un único mecanismo, lo cual se confirma con el cambio de pendiente que se observa en las curvas de energía de activación versus conversión.

Los valores del índice de pirólisis y de poder calorífica sugieren que los residuos veterinarios, incluidos todos los residuos hospitalarios, podrían ser aprovechados en la generación de energía mediante combustión y pirólisis, proporcionando un desarrollo energético sostenible a ciudades en continuo crecimiento, que buscan un avance rural sustentable desde el punto de vista energético y ambiental.

5. Agradecimientos

Los autores expresan su más sinceros agradecimientos a la Universidad Nacional de Colombia por el apoyo económico al proyecto “Características de pirólisis y cinética de degradación de los residuos sólidos veterinarios” con código HERMES 17890, al Laboratorio de Combustión Combustibles de la Universidad del Valle por su apoyo a la realización de los análisis, y a las estudiantes de programa de Ingeniería Química Linna Giseth Lucero Moran, Diana Marcela Hernández Gutiérrez y Estefany Ortiz Cardona, por el apoyo a la parte experimental del proyecto.

Referencias

- [1] J.A Blanco y F.G. Briceño, *Diseño de una planta de tratamiento de residuos sólidos hospitalarios y similares en el municipio de Arauca, capital*. Trabajo de grado en Ingeniería Ambiental. Universidad Nacional de Colombia, sede Arauca, 2005.
- [2] E.S. Windfeld y M.S. Brooks, “Medical waste management: A review”. *Journal of Environmental Management*, Volumen 163, 2015, pp. 98-108.
- [3] N. Deng, Y. Zhang y Y. Wang, “Thermogravimetric analysis and kinetic study on pyrolysis of representative medical waste composition”. *Waste Management*, Volumen 28, 2008, pp. 1572-1580.
- [4] J.H. Yan, H.M. Zhu, X.G. Jiang, Y. Chi, y K.F. Cen, “Analysis of volatile species kinetics during typical medical waste materials pyrolysis using a distributed activation energy model”, *Journal of Hazardous Materials*, Volumen 162, 2009, pp. 646-651.
- [5] J.W. Bujak, “Thermal treatment of medical waste in a rotary kiln”. *Journal of Environmental Management*, Volumen 162, 2015, pp. 139-147.
- [6] C.C. Lee, y G.L. Huffman, “Medical waste management/incineration”. *Journal of Hazardous Materials*, Volumen 48, 1996, pp. 1-30.
- [7] Q. Wang, W. Zaho, H. Liu, C. Jia y H. Xu, “Reactivity and kinetic analysis of biomass during combustion”. *Energy Procedia*, Volumen 17, 2012, pp. 169-875.
- [8] H.M. Zhu, J.H. Yan, X.G. Jiang, Y.E. Lai y K.F. Cen, “Study on pyrolysis of typical medical waste materials by using TG-FTIR analysis”. *Journal of Hazardous Materials*, Volumen 153, 2008, pp. 670-676.
- [9] J.W. Bujak, “Heat recovery from thermal treatment of medical waste”. *Energy*, Volumen 90, 2015, pp. 1721-1732.
- [10] C. Gai, Y. Dong y T. Zhang, “The kinetic analysis of the pyrolysis of agricultural residue under non-isothermal conditions”. *Bioresource Technology*, Volumen 127, 2013, pp. 298-305.
- [11] A.P Gallego y J.E. Castro, “Sobre el rol innovador de la educación energética para la investigación en ingeniería”. *Ingeniería*, Volumen 19 (2), 2014, pp. 147-163.
- [12] S. Vyazovkin, A.K. Burnham, J.M. Criado, L.A. Perez-Maqueda, C. Popescu y N. Sbirrazzuoli, “ICTAC kinetics committee recommendations for performing kinetic computations on thermal analysis data”. *Thermochimica Acta*, Volumen 520, 2011, pp. 1-19.

- [13] Q. Xu, X. Ma, Z. Yu y Z. Cai, "A kinetic study on the effects of alkaline earth and alkali metal compounds for catalytic pyrolysis of microalgae using thermogravimetry". *Applied Thermal Engineering*, Volumen 73, 2014, pp. 355-359.
- [14] X. Peng, X. Ma y Z. Xu, "Thermogravimetric analysis of co-combustion between microalgae and textile dyeing sludge". *Bioresource Technology*, Volumen 180, 2015, pp. 288-295.
- [15] G. Ruitenbergh, E. Woldt y A.K. Petford-Long, "Comparison the Johnson-Mehl-Avrami-Kolmogorov equations for isothermal and linear heating conditions". *Thermochimica Acta*, Volumen 378, 2001, pp. 97-105.
- [16] M. Tomellini, "Functional form of the Kolmogorov-Johnson-Mehl-Avrami kinetics for non-isothermal phase transformations at constant heating rate". *Thermochimica Acta*, Volumen 566, 2013, pp. 249-256.
- [17] A. Tabasova, J. Kropac, V. Kermes, A. Nemet y P. Stehlik, "Waste-to-energy technologies: impact on environment". *Energy*, Volumen 44, 2012, pp.146-155.
- [18] K. Slopiecka, P. Bartocci y F. Fantozzi, "Thermogravimetric analysis and kinetic study of poplar wood pyrolysis". *Applied Energy*, Volumen 97, 2012, pp.491-497.
- [19] K. Slopiecka, P. Bartocci y F. Fantozzi. *Thermal analysis and kinetic study of poplar Wood pyrolysis*, Third International Conference on Applied Energy, Perugia, Italia, Mayo de 2011, pp. 1687-1698.

Andrés Felipe Rojas González

Ingeniero Químico, Universidad Nacional de Colombia, Manizales; magíster en Ingeniería Química, Universidad del Valle; doctor en Ingeniería, énfasis Ingeniería Química, Universidad del Valle; actualmente se desempeña como Profesor Asociado en Dedicación Exclusiva en el área de térmicas en la Universidad Nacional de Colombia, Manizales, Colombia, y hace parte del Grupo de Investigación en Aprovechamiento de Residuos de la Universidad Nacional sede Manizales y del Grupo de Investigación en Prospectiva Ambiental de la Universidad Nacional de la Sede Palmira; director del Grupo de Investigación en Aprovechamiento de Residuos – GIAR - donde realiza estudios sobre Valorización de Residuos y Director del Laboratorio de Aprovechamiento de Residuos.
Correo electrónico: anfrojasgo@unal.edu.co

Laura María Aranzazu Ríos

Ingeniera Química, Universidad Nacional de Colombia, Manizales, Colombia; actualmente se desempeña como Jefe de Control de Calidad en la Planta de Alcoholes Sulfatados en la empresa Químicos del Cauca, Cauca, Colombia; es integrante activa del Grupo de Aprovechamiento de Residuos, GIAR, de la Universidad Nacional de Colombia, Manizales, Colombia.
Correo electrónico: laurisma21@gmail.com

Reporte de caso

Rediseño y Automatización de un Molde Para la Fabricación de Vitrinas Refrigeradas Usando Inyección de Espuma de Poliuretano

Redesign and Automation of a Mold for Manufacturing of Refrigerated Display Cases Using Polyurethane Foam Injection

Eugenio Yime Rodríguez¹, Jheifer Páez Almentero²

¹Universidad Tecnológica de Bolívar, ²NRG S.A.S

Recibido: 08-02-2016. Modificado: 28-04-2016. Aceptado: 02-08-2016

Resumen

Contexto: Con el objetivo de mantener la competitividad a lo largo de tiempo, una empresa debe someter continuamente sus procesos a mejoras y actualizaciones. En este caso se proponen mejoras con relación a la seguridad en el trabajo y la disminución en los tiempos que ocurren durante la operación de un molde para la fabricación de neveras.

Método: Se analizan las condiciones de operación del molde y se establecen los factores que afectan el tiempo de proceso y la seguridad del personal operativo. Las debilidades encontradas están relacionadas con el diseño intrínseco del molde, lo cual plantea la necesidad de realizar un rediseño estructural del mismo que además incluya la automatización del mismo.

Resultados: Se presenta una nueva forma de operar el molde el cual reduce el riesgo de accidentes laborales al no tener cargas pesadas sobre la cabeza de los operadores. Otro aporte del rediseño es el aumento en la rigidez del sistema el cual contribuye a disminuir los defectos de fabricación. Por último, se tiene un diseño de automatización que favorece la disminución de los tiempos de fabricación.

Conclusiones: Se obtienen mejoras significativas en la operación del molde, como son la reducción de los riesgos laborales y la disminución de los tiempos de fabricación de las neveras. Dichas mejoras se traducen en beneficios para la empresa, por medio de la reducción de costos e incremento de la producción. Ambos beneficios ayudan a fortalecer la competitividad de la compañía.

Palabras clave: Automatización de moldes de inyección, espuma de poliuretano, inyección de espuma de poliuretano, molde de poliuretano.

Agradecimientos: Los autores quieren agradecer al *Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación, COLCIENCIAS*, gracias al cual fue posible esta labor investigativa, al fomentar la investigación aplicada durante la convocatoria 548 de 2012, mediante el cual fue beneficiado el diseño descrito.

Open access



Citación: E. Rodríguez, J. Páez, "Rediseño y Automatización de un Molde para la Fabricación de Vitrinas Refrigeradas usando Inyección de Espuma de Poliuretano," *INGENIERÍA*, vol. 21, no. 3, pp. 290-304, 2016.
© Los autores; titular de derechos de reproducción Universidad Distrital Francisco José de Caldas. . En línea DOI: <http://dx.doi.org/10.14483/udistrital.jour.reveng.2016.3.a03>

Abstract

Context: To stay competitive over time, a company must continually submit their processes to improvements and updates. Herein are proposed some improvements with regard to safety at work and the reduction of time that occurs during the operation of a mold for manufacturing refrigerators.

Method: Some operating conditions of the mold are analyzed and then some factors affecting the processing time and the safety of operating personnel are established. The weaknesses found are related to the intrinsic design of the mold, which raises the need for a structural redesign that also includes automation.

Results: It is presented a new design and way to operate the mold which reduces the risk of accidents at having no heavy loads over operator heads. Another contribution of the redesign is the increase in the system rigidity which helps to reduce manufacturing defects. Finally, it is show a automation design which helps to reduce manufacturing times.

Conclusions: Significant improvements were obtained in the operation of the mold, such as the reduction of occupational hazards and reduced manufacturing time of refrigerators. These improvements translate into benefits for the company, by reducing costs and increasing production. Both benefits help strengthen the competitiveness of the company.

Keywords: Automation of injection mold, injection of polyurethane foam, polyurethane foam, polyurethane mold.

Acknowledgements: The authors wish to thank to *Departamento Administrativo de Ciencia y Tecnología e innovación COLCIENCIAS*, which made this investigation possible at promoting applied research during call 548-2012, where the design here in described was granted.

1. Introducción

Los poliuretanos son polímeros que contienen enlaces uretano y que se producen mediante la reacción de diisocianatos con polioles. La reacción básica entre un diisocianato y un polioliol produce un polímero de poliuretano con la liberación de calor; la formación de espuma se produce cuando se añade una pequeña cantidad de agente de soplado y agua durante la polimerización; el agua reacciona con grupos isocianato produciendo ácido carbámico, que pierden espontáneamente CO_2 , generando así las burbujas de espuma [1]. Las reacciones básicas de la química del poliuretano se describen con más detalle en [2].

La espuma de poliuretano tiene su principal uso en las aplicaciones de aislamiento térmico [2], [3], donde incluso se usan aditivos como los materiales de cambio de fase que actúan como amortiguadores para los cambios bruscos de temperatura [4]. Pero también tiene otras propiedades deseables como son el aislamiento acústico, la rigidez mecánica o su propiedad reológica, la cual le permite comportarse de manera híbrida, ya sea como sólido, o como viscoso, dependiendo de la forma como se manipule [5]. Debido a esas propiedades, la espuma se utiliza en diversos productos industriales, como son: fabricación de aviones, automóviles y empaçado de productos [6], [7]; en aplicaciones de construcciones civiles debido a su peso ligero, alta relación rigidez *versus* peso, resistencia a la corrosión, buena resistencia a la fatiga y alta durabilidad. También se suele usar en estructuras de materiales compuestos tipo emparedado para reemplazar los materiales convencionales [8], [9] y en geotecnia, donde constituye una importante solución para problemas de cimentación en edificaciones [10].

El proceso de inyección del poliuretano consiste en agregar cierta cantidad de poliuretano líquido en conjunto con el agente expansivo en un molde, esto hace que el poliuretano ocupe las cavidades vacías donde se ha inyectado a medida que se va solidificando, en [11] se muestra una simulación numérica y algunas consideraciones para el proceso. En caso de que se desee retirar el producto del molde, como ocurre con las sillas de automóviles donde el molde usualmente es metálico, se debe tratar previamente la superficie del molde con un agente protector para evitar la adherencia del poliuretano. Para el caso de artículos electrodomésticos, se desea que el poliuretano ayude a fijar las capas metálicas, por tanto no existe el tratamiento previo de las superficies.

Los parámetros de presión y densidad son muy importantes para la industria de la espuma de poliuretano, ya que la densidad es un requerimiento del producto a fabricar y la presión es esencial para fabricar el molde que contendrá la fuerza de expansión de la espuma. Pero el cálculo de la presión en el interior del molde y por lo tanto el diseño del molde, se basa en la experiencia del diseñador y ciertas estimaciones adicionales las cuales hacen que el molde quede sobredimensionado [12].

Si bien el proceso de inyección y moldeo del poliuretano es relativamente estándar y conocido, dependiendo de la aplicación para la cual se utilice y el producto a producir, el desarrollo generado puede ser sometido a registros de propiedad intelectual, como es el caso de las patentes. En este sentido, en [13] se ilustra un método para producir artículos de poliuretano que sean delgados y resistentes a la temperatura. En [14] se patenta un proceso de preparación de piezas de poliuretano a través de la inyección en molde, donde se describe el proceso de tratamiento de la superficie y el uso de catalizadores en el aditivo. En [15] se patenta una laca especial para ser usada en la creación de artículos de poliuretano por moldeo. La laca tiene propiedades que facilitan la separación del artículo del molde, en conjunto con una serie de compuestos químicos que le otorgan otras propiedades deseables. En [16] se patenta un proceso para producir artículos moldeados de poliuretano en donde se utiliza una capa protectora en el molde y dos inyecciones de uretano en la cavidad del molde. En [17] se patenta un cuerpo moldeado de poliuretano que se obtiene al reaccionar varias mezclas de poliols, disocianatos, dioles y otro componente. En [18] se patenta un proceso para obtener artículos moldeados de poliuretano donde la superficie se trata con un agente especializado que garantiza un ángulo menor de 30 grados entre la superficie y el poliuretano inyectado. En [19] se patenta un método para obtener techos moldeados de poliuretano. En [20] se patenta un método para obtener espuma de poliuretano y el molde necesario para ello.

En este artículo se ilustra el proceso de re-diseño de un molde de espuma de poliuretano para una nevera tipo mostrador, basados en la necesidades de reducir tiempos de operación, riesgos para los operarios y mejorar las condiciones de trabajo. Si bien desde el punto de vista de automatización pueden existir otras consideraciones [21], en este documento no se adentra en ese aspecto.

2. Metodología

El proyecto se dividió en tres pasos metodológicos globales. El primero fue un análisis riguroso del proceso actual, observando en detalle dos aspectos: seguridad del proceso y tiempos. Posteriormente, luego de identificar debilidades en cada uno de esos dos aspectos, se proponen alternativas

y se selecciona aquella que tenga mejor impacto (en el documento solo se muestran las alternativas seleccionadas). Por último, se procede a realizar el diseño mecánico y de automatización de la solución.

3. Análisis del molde actual

Durante el proceso de producción se ingresa un esqueleto de una vitrina dentro del molde de inyección. El molde está dividido en dos partes, una parte inferior que se encuentra fija y una pieza superior que es móvil. Para separar las partes se hace necesario utilizar un diferencial unido al techo que eleva la parte móvil a más de metro y medio. La Figura 1 ilustra el molde completamente cerrado, mientras que la Figura 2 ilustra el proceso de elevación de la parte móvil en conjunto con la apertura de la parte fija.



Figura 1. Molde cerrado



Figura 2. Molde abierto

El proceso antes descrito tiene dos actividades que desde el punto de vista de seguridad de la operación se desean eliminar:

- Levantamiento del bloque central del molde mediante un diferencial .
- Movimiento del chasis de las vitrinas con el bloque central del molde colgando sobre las cabezas de los trabajadores.

La segunda actividad es la que más riesgo representa debido a que puede resultar en golpes y la muerte en caso de caída de la carga.

Otro aspecto importante es el tiempo de operación del molde, en la tabla I se observan dos de las tres etapas del proceso. En el presente trabajo investigativo se enfocó principalmente en las siguientes:

- En Pre-Inyección se eliminó el tiempo para *Introducir molde macho* y se redujo el tiempo para *Cierre del molde*. Los tiempos actuales suman 59 segundos.

Tabla I. Oportunidades de mejora del proceso de inyección

| Sub-etapa | Actividad | Tiempo actual (Seg) | Oportunidad de Mejora | Acción |
|----------------|------------------------|---------------------|-----------------------|----------|
| Pre-Inyección | Introducir molde macho | 27,63 | Alta | Eliminar |
| | Cierre del molde | 31,58 | Alta | Reducir |
| Post-Inyección | Retirar molde macho | 23,98 | Alta | Eliminar |
| | Apertura del molde | 35,98 | Alta | Reducir |

- En Post-Inyección se eliminó el tiempo para *Retirar molde macho* y se redujo el tiempo para *Apertura del molde*. Los tiempos actuales suman 60 segundos.

Dentro de otras debilidades halladas se encuentra también la resistencia mecánica del molde, el cual tenía elementos que habían cedido debido las fuerzas producto de la presión ejercida por el poliuretano al expandirse. La consecuencia de esta debilidad era que algunas vitrinas no cumplían con los patrones de calidad al presentar diferencias apreciables en sus dimensiones internas y externas.

4. Propuesta de mejora

A fin de evitar levantar el bloque central se decide girar el molde 90° sobre su base trasera. Con este cambio el ingreso y egreso de la nevera se realizará de manera horizontal, ingresando por la parte inferior del molde actual, Figura 3. Adicionalmente, se realizará un rediseño mecánico teniendo en cuenta las fuerzas generadas durante la expansión del poliuretano. Este rediseño busca reforzar el molde sin incrementar el peso total. Otro aspecto a mejorar son los tiempos de apertura y cierre del molde. En la actualidad los tiempos no son uniformes debido a que los operarios tienen que realizar esfuerzos para desbloquear el molde. Se propone automatizar las operaciones de apertura y cierre de manera que los tiempos sean menores y más uniformes. Todos los cambios propuestos apuntan a un mejoramiento del proceso que sea atractivo para la empresa, por cuanto se reducen los ries-

gos asociados al movimiento, levantamiento de cargas y trabajar bajo de ellas, también se podría disminuir las pérdidas e incrementar la producción.

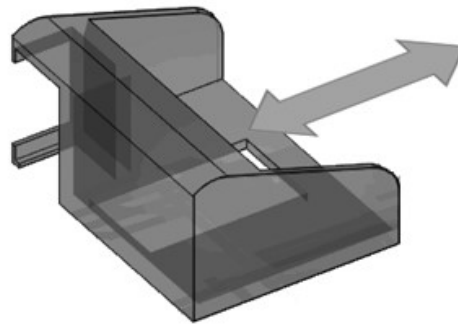


Figura 3. Esquema conceptual del ingreso y egreso horizontal

Al operar la nevera en posición horizontal los trabajadores solo tienen que empujarla para realizar la acción de ingreso. A fin de retirar la nevera los operadores solo tienen que deslizarla fuera del molde ya que el molde la liberará a través de un pistón que realizará la extracción reemplazando la acción mecánica en el caso del molde actual.

El proceso de re-diseño mecánico tiene en cuenta determinar la magnitud de las fuerzas y presiones presentes en la estructura y en cada uno de los eslabones mecánicos del sistema. Con estas

fuerzas y presiones, se procede a determinar si cada eslabón o componente mecánico puede tolerar el estado de esfuerzo, en caso contrario se debe proceder a modificar geoméricamente la pieza para asegurar su resistencia mecánica. El análisis de esfuerzo se realiza utilizando el método de los elementos finitos a través del uso de herramientas CAE, el cual es un procedimiento ampliamente aceptado en Ingeniería Mecánica cuando la geometría de las piezas es reactivamente compleja. Una vez se comprueba la resistencia mecánica de cada pieza, se procede a ensamblar el conjunto mecánico y simular el movimiento empleando un software CAD para ello.

La variable de entrada del proceso de diseño mecánico es la presión ejercida por el poliuretano al expandirse. Este valor depende mucho del producto a generarse. Si la presión se hace mayor se obtiene un poliuretano más denso. Debido al amplio rango de posibilidades, es necesario hacer una prueba experimental en los moldes actuales para determinar el valor real de la presión en el interior del molde, con base en este valor se dimensionan las nuevas piezas del molde. La herramienta computacional de simulación por elementos finitos que se utiliza es NASTRAN. La fase de diseño mecánico se describe con mayor detalle en la siguiente sección.

En la fase de automatización del molde, se procede a realizar un ensamble mecánico asistido con el uso del software Solid Edge, el cual permite simular el movimiento mecánico del conjunto y garantizar que la nevera pueda ingresar y egresar sin problemas. El software permite además obtener las fuerzas y velocidades necesarias para la selección de los actuadores neumáticos.

5. Rediseño mecánico

En la revisión de la literatura muy poco se encuentra acerca de la presión real en el interior del molde. En [12] se realiza una medición obteniendo un valor máximo de 1,6 bares. Sin embargo, esta medición está muy relacionada con el tipo de molde utilizado.

En este trabajo, la medición de la presión se realiza mediante un sistema de transducción mecánica basado en el principio de pascal, para ello se toma un neumático número 12, lleno de agua y unido con una manguera de aplicaciones neumáticas a un manómetro, Figura 4. La idea de fondo



Figura 4. Dispositivo mecánico utilizado para la medición de la presión de expansión del poliuretano

Tabla II. Presión medida

| Prueba | Presión inicial | Presión final | Diferencia de presión |
|--------|-----------------|---------------|-----------------------|
| 1 | 3,2 | 9 | 5,8 |
| 2 | 2,3 | 8 | 5,7 |
| 3 | 1,8 | 7 | 5,2 |
| 4 | 2,9 | 7,8 | 4,9 |
| 5 | 2,5 | 7,8 | 5,3 |
| 6 | 2,3 | 7 | 4,7 |

es que la presión ejercida por el poliuretano al expandirse comprime el líquido en el interior del neumático y debido a que la manguera también está llena de agua la presión se transmite hasta el dispositivo de medición. Debido a que la posición del neumático puede afectar la medición, este se coloca cerca del punto de inyección, pensando en obtener en ese lugar los mayores valores de presión. Esta afirmación se refuerza al observar que la mayor deformación de la nevera con el molde actual, el cual tiene juego en las puertas y permite deformaciones en la nevera, se observa cerca al punto de inyección.

La medición se repitió para varias neveras. Se tomaron los datos de la presión inicial, es decir antes de que se inyecte poliuretano en el molde y luego de finalizado el tiempo de crecimiento de la espuma, es decir cuando la presión medida se estabiliza. El valor de interés es la diferencia entre las dos medidas. La prueba se realizó seis veces para analizar la variación de la presión y determinar el máximo valor medido. Lastimosamente por razones de control de calidad y costos, se tenía una muestra fija de neveras las cuales se convirtieron en desperdicio al ser rechazadas para la venta. Los resultados obtenidos se agrupan en la Tabla II.

A partir de los valores observados se toma un valor de 9 psi para el diseño mecánico del molde, este valor está un 50 % más alto que el máximo observado, el cual es cercano a los 6 psi, debido a que pueden haber errores ocasionales de la cantidad de material inyectado. Para mayor seguridad en el diseño mecánico se toman factores de seguridad adicionales para considerar los casos de fatiga mecánica.

El diseño mecánico es un proceso iterativo en donde se empieza con una geometría deseada. A esta geometría se le realiza un análisis de elementos finitos para determinar la resistencia de las piezas del molde tanto para carga estática, como por fatiga. Para cada análisis de elementos finitos se hace un análisis de sensibilidad de las piezas para determinar la variación de la carga con el tipo de mallado. Al finalizar el análisis de elementos finitos, se procede a aceptar la pieza o a cambiar la geometría según los resultados obtenidos. Este proceso se repitió para cada pieza involucrada en el diseño. En las Figuras 5, 6 y 7 se ilustran los resultados de tres simulaciones por elementos finitos de tres tipos de piezas de ejemplo. Una vez se validaron las dimensiones mecánicas de cada pieza con ayuda del análisis de resistencia por elementos finitos, se procedió a realizar el ensamble final en el software CAD y generar los planos mecánicos de cada una de las piezas.

Otro aspecto importante que se realizó durante el diseño mecánico, fue la selección de los mecanismos de bloqueo del molde interno, los cuales se emplean para evitar que el molde se mueva cuando el poliuretano se expande y eleva las fuerzas ejercidas sobre las paredes. En el molde actual

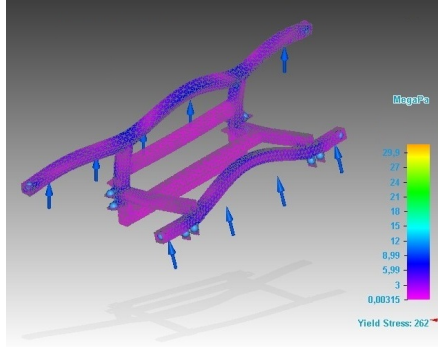


Figura 5. Piezas móviles que permiten el ingreso y egreso

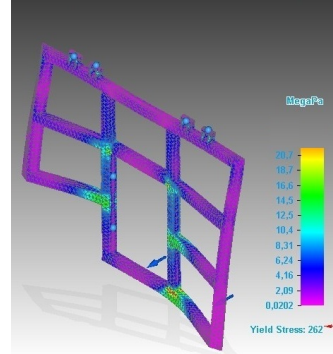


Figura 6. Piezas de bloqueo automático que impiden el movimiento

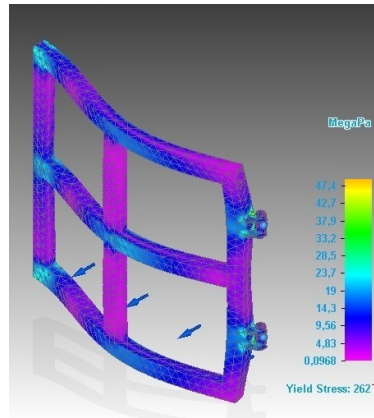


Figura 7. Piezas de bloqueo automático que impiden el movimiento

de parte fija y móvil, existen varios mecanismos de bloqueo, la mayoría de difícil acceso, los cuales son activados por los operadores. El principal inconveniente con este sistema de bloqueo es que los mecanismos de bloqueo no son fáciles de liberar.

La Figura 8 ilustra de color rojo las piezas móviles que se desplazan para permitir el ingreso o egreso del molde. Estas piezas se denominan soporte inferior y soportes laterales. La figura 9 ilustra también de color rojo los mecanismos de bloqueo automático que se emplearon para bloquear el movimiento no deseado de las piezas anteriores. Las Figuras 10 y 11 ilustran la forma de acción de los bloqueadores del soporte inferior.

Para resaltar, la etapa de diseño mecánico fue un proceso iterativo, como se mencionó antes, el cual tuvo una duración total de siete meses. Al finalizar dicho proceso, se obtuvieron 57 planos mecánicos correspondientes a 34 piezas diseñadas.

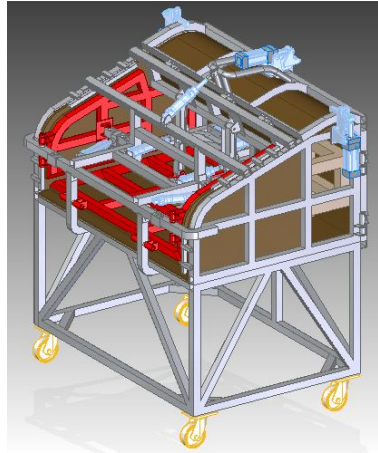


Figura 8. Piezas móviles que permiten el ingreso y egreso

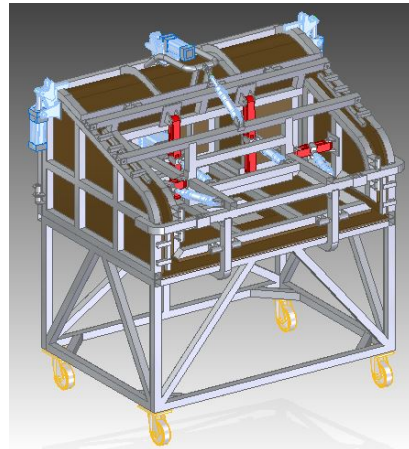


Figura 9. Piezas de bloqueo automático que impiden el movimiento

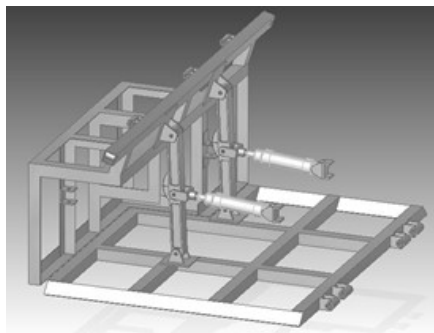


Figura 10. Mecanismo de bloqueo asegurando soporte inferior

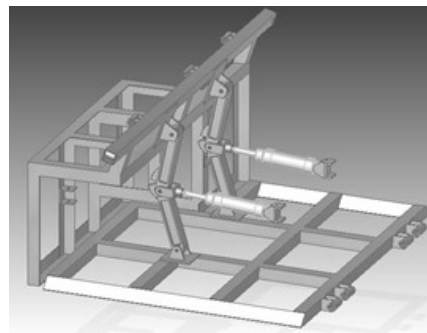
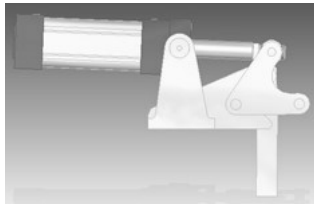
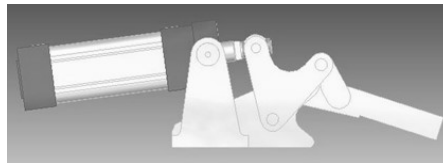


Figura 11. Mecanismo de bloqueo liberando soporte inferior

6. Automatización

La automatización del sistema busca evitar la intervención del operador durante la apertura del molde para el ingreso de la nevera, el cierre del molde para realizar la inyección de poliuretano y la posterior expulsión de la nevera al finalizar el proceso de expansión del poliuretano. El objetivo es reducir los riesgos de accidentes durante la manipulación del molde y la nevera y disminuir los tiempos de operación. La automatización debe involucrar las siguientes actividades:

1. Apertura y cierre de las puertas posteriores para permitir el ingreso y egreso de las neveras.
2. Movimientos de apertura y cierre de los mecanismos laterales e inferiores de bloqueo del molde, con el fin de permitir el ingreso o egreso de la nevera.

**Figura 12.** Mecanismo de bloqueo asegurado**Figura 13.** Mecanismo de bloqueo liberado

3. Bloqueo y desbloqueo de las puertas laterales y superiores.
4. Eyección para facilitar la salida del chasis después de la inyección.

Cada actividad se automatiza utilizando pistones neumáticos con sus respectivos circuitos. En total se emplean trece pistones neumáticos para la automatización del molde. De esos, tres pistones se encargan de la primera actividad, la apertura y cierre de las puertas. Otros cinco pistones se utilizan para el bloqueo de las puertas. cuatro pistones adicionales se emplean para el bloqueo interno de la nevera, tal como se ilustra en las Figuras 8 a 11. La última actividad se realiza con un pistón el cual es el encargado de sacar la nevera del molde cuando haya finalizado la inyección y expansión del poliuretano.

Los circuitos neumáticos relacionados con cada pistón se diseñaron utilizando los procedimientos y teoría práctica explicada en los textos [22], [23] y [24]. Los pistones seleccionados para realizar las tareas son de dos tipos: unos de actuación y otros de bloqueo automático. Los pistones de bloqueo automático se ilustran en la Figuras 12 y 13. La clave es el mecanismo de bloqueo, el cual es un producto comercial, e impide la apertura de las puertas durante el proceso de expansión del poliuretano. El mecanismo de sujeción neumática se seleccionó para trabajar a 5 bares, con lo cual puede producir una fuerza máxima de bloqueo de hasta 17,8 *KN*. Estos pistones se referencian con los nombres P1 a P5 en el circuito neumático de la Figura 14. El circuito para este pistón consta de un pulsador, S1, y cinco válvulas, V1 a V5. Las válvulas son de cinco vías y dos posiciones con retorno por fuelle, el pulsador S1 es de dos posiciones.

El funcionamiento del circuito es el siguiente: en la posición de bloqueo del pulsador S1 el sistema de anclaje bloquea el movimiento de las puertas, en la otra posición de S1 realiza los movimientos de apertura y cierre de las puertas.

El segundo circuito neumático, Figura 15, es similar en funcionamiento a este primer circuito, Figura 14. Su función es mover los pistones que activan las piezas mecánicas que bloquean el movimiento de las paredes internas del molde, las dos de los laterales y la inferior, ver Figuras 8 a 11. El objetivo es que en la posición ilustrada en la Figura 11 se permita el ingreso suave de la nevera al molde al tener retraídas las paredes internas. Una vez la nevera esté dentro del molde los pistones posicionara el mecanismo como se ilustra en la Figura 10 para impedir el movimiento de las paredes, Los movimientos se logran cambiando de posición al pulsador S2 de la misma forma cómo funciona el primer circuito neumático.



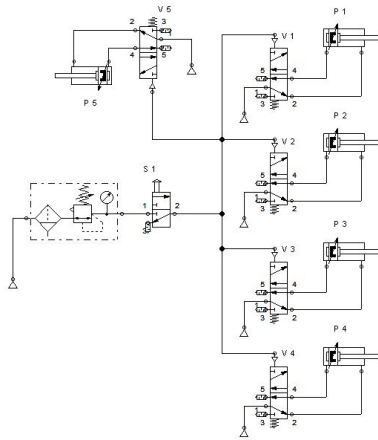


Figura 14. Circuito neumático de bloqueo de puertas

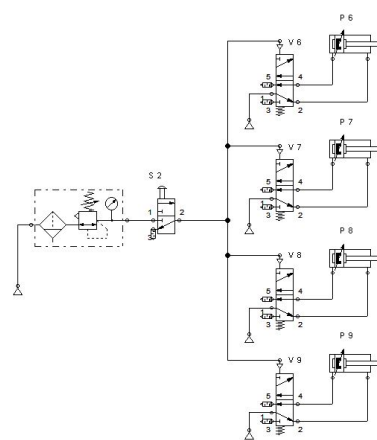


Figura 15. Circuito bloqueador de mecanismos laterales e inferiores

El tercer circuito neumático, Figura 16, se encarga de mover los pistones de las puertas, en una posición se abren las puertas y en la otra se cierran. Su funcionamiento es similar a los otros dos circuitos.

El cuarto y último circuito, Figura 17, activa el actuador eyector del chasis una vez se haya expandido el poliuretano al interior del mismo. Su función es expulsar la nevera. Al mover S4 se logrará que el pistón salga y lleve consigo el chasis de la nevera, lo cual hará que esta salga del molde. En la otra posición se permite el ingreso de la nevera al molde ya que el pistón estará retraído.

Un resumen de la lógica de funcionamiento del sistema para el egreso del chasis de la nevera es el siguiente:

Para el

1. Mover S1 hacia la posición de apertura para lograr que los anclajes liberen las puertas.
2. Mover S2 hacia la posición de apertura para liberar el chasis y permitir su movilidad al interior del molde.
3. Mover S3 hacia la posición de apertura para abrir las puertas externas.
4. Mover S4 hacia la posición de eyección para eyectar el chasis de la nevera.

El procedimiento para el ingreso del chasis al molde es el inverso, es decir:

1. Mover S4 hacia la posición de retracción para que el eyector regrese a la posición de recogida y no estorbe el ingreso del chasis.
2. Ingresar el chasis sin inyectar.

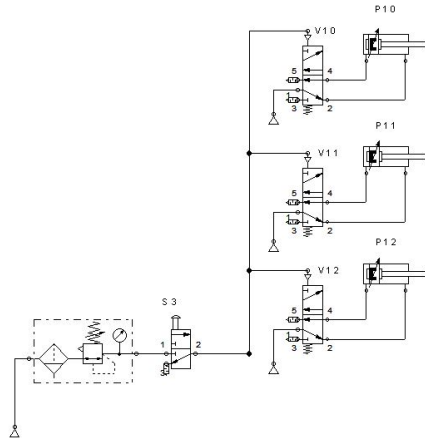


Figura 16. Circuito de apertura y cierre de puertas

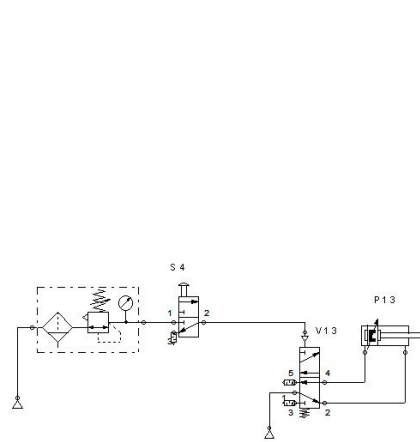


Figura 17. Circuito pistón eyector de la nevera

3. Mover S3 hacia la posición de cierre para cerrar las puertas externas.
4. Mover S2 hacia la posición de cierre para aprisionar el chasis y restringir su movilidad durante la expansión de la espuma de poliuretano.
5. Mover S1 hacia la posición de cierre para bloquear los anclajes de las puertas.
6. Realizar la inyección de poliuretano.

Los procedimientos antes descritos se simularon en el software CAD con el objeto de calcular las fuerzas y velocidades requeridas por los pistones, con estos valores se seleccionaron los pistones según los criterios de desempeño establecidos por los fabricantes. Es importante aclarar que el proceso de diseño mecánico se utilizan factores de seguridad para poder tener en consideración variaciones en la carga. El factor de seguridad mínimo utilizado en la selección de cada pistón según la carga a soportar fue de cinco, el cual si bien es un poco alto, se tomó de esta manera por cuanto se observó durante la operación del molde actual que los operadores algunas veces modifican las operaciones realizadas produciéndose las variaciones observadas en la presión de inyección. El factor de seguridad también sirve para mitigar el efecto de la fricción sobre el movimiento de las puertas y cada pieza móvil. La simulación del movimiento en el software CAD fue de diez segundos para el proceso de apertura o cierre. Esto representa una ventaja significativa respecto a los tiempos actuales del proceso, por cuanto en el molde actual los trabajadores realizan el ingreso y egreso en tiempos mayores.

Se puede concluir que con el proceso de re-diseño, el molde tendrá un desempeño mínimo en la apertura y cierre alrededor de los diez segundos. El tiempo real dependerá del resto del proceso de fabricación, pero como es bien sabido en Ingeniería Mecánica, la selección adecuada de actuadores basado en las fuerzas esperadas y los factores de seguridad utilizados garantizan que se cumplan las expectativas.

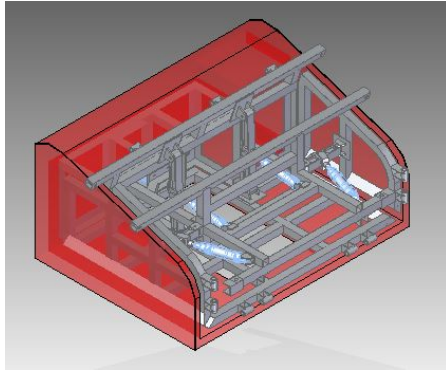


Figura 18. Molde interno

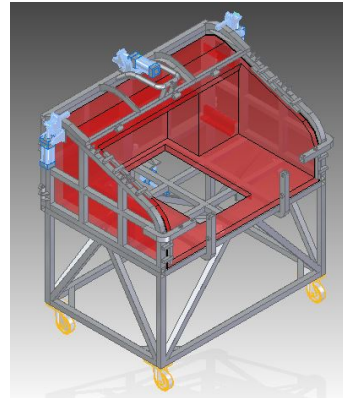


Figura 19. Molde externo

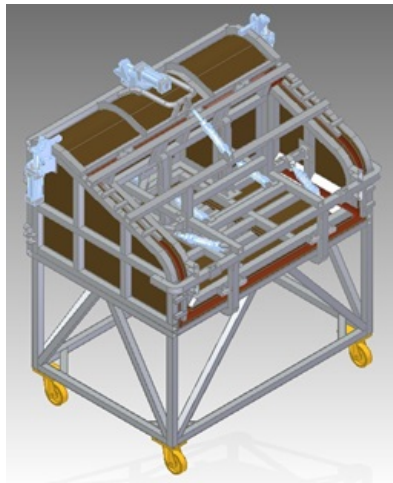


Figura 20. Ensamble final del molde

7. Conclusiones

El proceso de rediseño del molde y la automatización del mismo supone una ventaja competitiva respecto al molde actual. En ese sentido, se logró reducir el tiempo de ingreso y egreso de 60 a 10 segundos, tiempo relacionado con el movimiento del molde interno, el accionamiento de los sistemas de bloqueos y la apertura y cierre del molde. Adicionalmente, se reducen los riesgos para los trabajadores al no tener que trabajar debajo de una carga pendular y se reduce la fatiga física porque éste no tiene que realizar ningún esfuerzo físico límite.

Respecto al diseño mecánico. Al finalizar el proceso de rediseño, se contó con 57 planos mecánicos que representan alrededor de 34 piezas. Las figuras 18 y 19 ilustran los sub-ensambles básicos

que hacen parte de dicho molde, el ensamble del molde exterior y el ensamble del molde interior. La figura 20 ilustra el ensamble CAD completo del conjunto en la posición cerrada.

Referencias

- [1] N. Sarier and E. Onder, "Thermal characteristics of polyurethane foams incorporated with phase change materials," *Thermochimica Acta*, vol. 454, pp. 90–98, Mar. 2007.
- [2] A. Demharter, "Polyurethane rigid foam, a proven thermal insulating material for applications between +130°C and -196°C," *Cryogenics*, vol. 38, pp. 113–117, Jan. 1998.
- [3] H. Plt, "Making fridge cabinets in an automated press line," *Production Engineer*, vol. 64, p. 37, Feb. 1985.
- [4] C. Yang, L. Fischer, S. Maranda, and J. Worlitschek, "Rigid polyurethane foams incorporated with phase change materials: A state-of-the-art review and future research pathways," *Energy and Buildings*, vol. 87, pp. 25–36, Jan. 2015.
- [5] W. Drenckhan and A. Saint-Jalmes, "The science of foaming," *Advances in Colloid and Interface Science*, no. 222, pp. 228–259, 2015.
- [6] L. J. Gibson and M. F. Ashby, *Cellular Solids*. Cambridge University Press, 2 ed., 1999.
- [7] F. Saint-Michel, L. Chazeau, and J.-Y. Chavaill, "Mechanical properties of high density polyurethane foams: II Effect of the filler size," *Composites Science and Technology*, vol. 66, pp. 2709–2718, Dec. 2006.
- [8] M. Mohamed, S. Anandan, Z. Huo, V. Birman, J. Volz, and K. Chandrashekhara, "Manufacturing and characterization of polyurethane based sandwich composite structures," *Composite Structures*, vol. 123, pp. 169–179, May 2015.
- [9] H. Tuwair, M. Hopkins, J. Volz, M. A. ElGawady, M. Mohamed, K. Chandrashekhara, and V. Birman, "Evaluation of sandwich panels with various polyurethane foam-cores and ribs," *Composites Part B: Engineering*, vol. 79, pp. 262–276, Sept. 2015.
- [10] R. Valentino, E. Romeo, and D. Stevanoni, "An experimental study on the mechanical behaviour of two polyurethane resins used for geotechnical applications," *Mechanics of Materials*, vol. 71, pp. 101–113, Apr. 2014.
- [11] J. Bikard, J. Bruchon, T. Coupez, and L. Silva, "Numerical simulation of 3d polyurethane expansion during manufacturing process," *A Collection of Papers Presented at the 6th Eufoam Conference, Potsdam, Germany, 2-6 July, 2006*, vol. 309, pp. 49–63, Nov. 2007.
- [12] P. Grb and J. Marosfalvi, "Investigation of the pressure generated in the mould cavity during polyurethane integral skin foam moulding," *eXPRESS Polymer Letters*, vol. 2, no. 7, pp. 511–519, 2008.
- [13] K. Kobayashi and N. Mise, "Method for preparing polyurethane molded articles," 1971.
- [14] G. Mohiuddin, "Process for preparing polyurethane molded part," Aug. 1981. US Patent 4,282,285.
- [15] B. Falline and B. Weihrach, "Lacquer coating process for polyurethane-molded articles," Dec. 1990. US Patent 4,980,107.
- [16] M. Kurokawa, T. Ito, and T. Asaya, "Process for producing polyurethane molded articles," May 2002. US Patent 6,383,423.
- [17] H. Mhlfeld, T. Schaubert, and S. Wagener, "Molded polyurethane body," June 2003. US Patent 6,573,341.
- [18] M. Okubo, K. Kiuchi, R. Hashimoto, T. Nomura, M. Mori, and K. Miyamoto, "Process for producing molded article," Nov. 2003. US Patent App. 10/465,751.
- [19] M. Anghel, "Polyurethane molded roofing structures," Sept. 2005. US Patent App. 11/047,272.
- [20] T. Fujita, "Method of producing polyurethane mold foam and polyurethane mold foam," May 2007. US Patent App. 10/566,176.
- [21] D. C. Hall, "Automating injection moulding-some economic considerations," *Production Engineer*, vol. 67, pp. 29–31, Apr. 1988.
- [22] S. M. Teja, *Automatización neumática y electroneumática*, vol. 1. Marcombo, 1995.
- [23] A. S. Nicolás, *Neumática práctica*. Editorial Paraninfo, 2010.
- [24] A. C. Solé, *Neumática e hidráulica*. Marcombo, 2012.

Eugenio Yime Rodríguez

Ingeniero Mecánico de la Universidad del Norte. Doctorado en Automatización y Robótica de la Universidad Politécnica de Madrid. Actualmente labora en la Universidad Tecnológica de Bolívar en el programa de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica. Sus áreas de interés son el diseño Mecánico y Mecatrónico de sistemas, el análisis cinemático y dinámico de mecanismos y robots; y el control no lineal de robots paralelos. correo electrónico: eyime@unitecnologica.edu.co

Jheifer Páez

Ingeniero Mecatrónico de la Universidad Tecnológica de Bolívar. Estudiante de segundo semestre de la Maestría en Ingeniería - Énfasis en Ingeniería Eléctrica/Electrónica en la Universidad Tecnológica de Bolívar. Sus áreas de interés son el diseño Mecatrónico de sistemas y la robótica marina y en general. correo electrónico: jheiferpaez@gmail.com

Research paper

3D Semantic Modeling of Indoor Environments based on Point Clouds and Contextual Relationships

Modelado Semántico 3D de Ambientes Interiores basado en Nubes de Puntos y Relaciones Contextuales

Angie Quijano¹, Flavio Prieto¹

¹Departamento de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica, Universidad Nacional de Colombia.
Correspondence email: faprieto@unal.edu.co

Recibido: 29-01-2016. Modificado: 30-06-2016. Aceptado: 15-07-2016

Abstract

Context: We propose a methodology to identify and label the components of a typical indoor environment in order to generate a semantic model of the scene. We are interested in identifying walls, ceilings, floors, doorways with open doors, doorways with closed doors that are recessed into walls, and partially occluded windows.

Method: The elements to be identified should be flat in case of walls, floors, and ceilings and should have a rectangular shape in case of windows and doorways, which means that the indoor structure is Manhattan. The identification of these structures is determined through the analysis of the contextual relationships among them as parallelism, orthogonality, and position of the structure in the scene. Point clouds were acquired using a RGB-D device (Microsoft Kinect Sensor).

Results: The obtained results show a precision of 99.03% and a recall of 95.68%, in a proprietary dataset.

Conclusions: A method for 3D semantic labeling of indoor scenes based on contextual relationships among the objects is presented. Contextual rules used for classification and labeling allow a perfect understanding of the process and also an identification of the reasons why there are some errors in labeling. The time response of the algorithm is short and the accuracy attained is satisfactory. Furthermore, the computational requirements are not high.

Keywords: Indoor environment, Kinect, point cloud, semantic modeling.

Acknowledgements: This work was supported by COLCIENCIAS (Department of Science, Technology, and Innovation of Colombia), and by the Universidad Nacional de Colombia under agreement 566 of 2012 Jóvenes investigadores e innovadores 2012.

Language: English



Citation: A. Quijano, F. Prieto, "3D Semantic Modeling of Indoor Environments based on Point Clouds and Contextual Relationships," INGENIERÍA, vol. 21, no. 3, pp. 305-323, 2016.

© The authors; copyright holder Universidad Distrital Francisco José de Caldas. En línea DOI: <http://dx.doi.org/10.14483/udistrital.jour.reveng.2016.3.a04>

Resumen

Contexto: Se propone una metodología para identificar y etiquetar los componentes de la estructura de un ambiente interior típico y así generar un modelo semántico de la escena. Nos interesamos en la identificación de: paredes, techos, suelos, puertas abiertas, puertas cerradas que forman un pequeño hueco con la pared y ventanas parcialmente ocultas.

Método: Los elementos a ser identificados deben ser planos en el caso de paredes, pisos y techos y deben tener una forma rectangular en el caso de puertas y ventanas, lo que significa que la estructura del ambiente interior es Manhattan. La identificación de estas estructuras se determina mediante el análisis de las relaciones contextuales entre ellos, paralelismo, ortogonalidad y posición de la estructura en la escena. Las nubes de puntos de las escenas fueron adquiridas con un dispositivo RGB-D (Sensor Kinect de Microsoft).

Resultados: Los resultados obtenidos muestran una precisión de 99.03% y una sensibilidad de 95.68%, usando una base de datos propia.

Conclusiones: Se presenta un método para el etiquetado semántico 3D de escenas en interiores basado en relaciones contextuales entre los objetos. Las reglas contextuales usadas para clasificación y etiquetado permiten un buen entendimiento del proceso y, también, una identificación de las razones por las que se presentan algunos errores en el etiquetado. El tiempo de respuesta del algoritmo es corto y la exactitud alcanzada es satisfactoria. Además, los requerimientos computacionales no son altos.

Palabras clave: Ambientes interiores, Kinect, modelado semántico, nube de puntos.

Agradecimientos: Este trabajo fue financiado por el Departamento Administrativo de Ciencia y Tecnología de Colombia (COLCIENCIAS) y por la Universidad Nacional de Colombia bajo el Acuerdo 566 de 2012 Jóvenes investigadores e innovadores.

1. Introduction

The automatic 3D modeling of urban scenes is an important topic in the image processing and machine vision field. Semantic 3D modeling of indoor environments encodes the geometry and identity of the main components of these places such as walls, floors and ceilings. Because the manual reconstruction of these models is a slow process prone to error, it would be ideal for this procedure to be automatic and accurate to provide significant improvements that can aid in important tasks in areas such as architecture and robotics [1].

In the field of architecture and construction, semantic 3D models are increasingly being used in the process of building construction and in the phase of facility management. Furthermore, these models are used to plan reforms and maintenance for buildings [2]. Additionally, in applications such as robotics, semantic models endow robots with the ability to describe an environment at a higher conceptual level. This ability is reflected in a representation that can be shared between humans and robots [3]. Therefore, robots will be able to carry out complex tasks in cooperation with humans [4]. Robots perceive the world through information collected by a variety of sensors, and the most popular sensors for this type of application are cameras and range scanners, which are used for semantic labeling of indoor [5], outdoor scenes and even underwater scenes [6].

Indoor modeling is an issue that begins with data collection, where the selection of the sensor is important in order to acquire accurate data and design the appropriate method to handle them.

Furthermore, this process presents many difficulties due to the diversity of indoor environments [7]–[9]. Additionally, the quantity of objects present in these indoor environments which represent occlusions and visibility problems, increase the complexity of this challenge. The method proposed here to face the indoor modeling challenge includes: data collection, pre-processing, segmentation, characterization and classification.

The aim of this work is focused on obtaining a semantic labeling of indoor environments with Manhattan structure, quickly and accurately, using simple classifiers. Thus, we propose a technique to classify and label walls, ceilings, floors, doorways with open doors, doorways with closed doors recessed into walls, and partially occluded windows. This technique uses contextual and geometric relationships as centroids and normal vectors (that is the indoor structure must be Manhattan [10]), to infer the structures and classify them. Furthermore, in spite of the simplicity of the used classifier, the time response of the algorithm is short and the accuracy attained is satisfactory.

Different types of sensors have been used for indoor modeling. Several researchers have faced the problem of reconstruction and classification of scenes from a single camera [11]–[15] because this type of sensor is not expensive, is easy to install and does not demand high computational requirements. However, these sensors do not offer the expected precision and accuracy. Laser Scanners are being used for detailed modeling of indoor and outdoor environments [1], [2], [16]–[19]. The Laser Scanners provide an accurate three-dimensional measure of visible surfaces of the environment, but this information has a low semantic level. Furthermore, the Laser Scanners have a high cost with a complex coupling to the system. For these reasons, for indoor environments, it is more convenient to work with a device that offers a high description level of the environment that includes the shape, size, and geometric orientation of the objects, and it is even better if this device provides portability and simplicity to the system. In this way, the Microsoft Kinect Sensor [20] is proposed to face the 3D semantic modeling of indoor scenes. This device is an economic three-dimensional sensor that not only provides color information but also depth information; thus, the Microsoft Kinect Sensor is considered a RGB-D sensor. Although it is important to recognize that Laser Scanners can accurately and rapidly produce data, their price is between 10 and 150 times the price of the Kinect Sensor. Several authors have used this sensor with this purpose [3], [21], [22].

Semantic modeling of indoor scenes requires a coherent methodology, which starts with a data collection that allows digitalization of the environment, avoiding as much noise as possible and obtaining a globally consistent scene. One of the better options to achieve these goals is to register different 3D views of the scene, represented in multiple point clouds. However, because these techniques are based on Iterative Closest Point algorithms, they require an initial guess and are not very fast because they must find the closest point pairs [23]. For this reason, we propose to carry out a controlled data collection strategy in which each capture is taken at a previously defined angle with the purpose of creating a point cloud that represents the whole scene executing geometric transformations, thus avoiding any error and streamlining the process.

In machine learning tasks, feature extraction plays an important role as it affects the generalization ability and the system over-fitting. Several features can be used in the semantic labeling of indoor scenes. Mozos *et al.* [24] extracted two sets of simple features from the range data. One of

these sets comes from the image of the sensor, and the other set comes from a polygonal approximation of the observed area. They use approximately 150 features. Some of these features are area, perimeter, mean distance between centroid and the shape boundary, etc. Shi *et al.* [3] propose 27 features that include descriptors derived from invariant 3D moments, the number of observed points, the volume of the convex hull, the mean and the standard deviation of the distance from sensor to points, among others. Nüchter and Hertzber [25] and Flint *et al.* [26] identify existing plans in a set of point clouds through the Random Sample Consensus (RANSAC) algorithm [27] and assume that the biggest structures, such as ceilings, walls, and floors are characterized by their flat and perpendicular orientation. The drawback of using a large quantity of features (curse of dimensionality) is that the execution time of the algorithm is long, and the computational requirements increase without ensuring a better performance. For this reason, the number of features used in this work is smaller, and these features are selected based on contextual relationships. These types of features facilitate the detection and correction of errors, as they are readily observable.

The paper is organized as follows: First, an introduction of each part of the proposed methodology is presented in Section 2. In Section 3 the pre-processing of these point clouds, their segmentation in planes, and their characterization and classification are explained. Then, in Section 4, the segmentation carried out for doorways and windows is presented. Finally, the paper concludes with Results and Conclusion sections.

2. Data collection

Before approaching the methodology used to label indoor scenes, it is essential to clarify the importance of the coordinate frame positioning relative to the scene to obtain good results. Because the classification depends on features such as normals, centroids, and maxima and minima of the structures to obtain more accurate results, it is important that the coordinate frame be located in a way that the y axis is at 90° relative to the floor.

Point cloud registration, as implemented in this paper, is based on a geometric transformation in which the coordinate frame is located in the camera center when the camera is vertical. Also, it is important to clarify that the data to be registered is horizontally and vertically aligned. The vertical sweep that is obtained is controlled by the internal motor of the sensor using the library “Libfreenect” [28]. The program developed with this purpose grabs a point cloud every 10° , in the range $[-30, 30^\circ]$. While the clouds are taken, the program transforms each one of these clouds to the coordinate frame considering that a displacement vector is generated because the origin of the rotation axis of the Kinect is not at the camera center. To calculate this vector, a geometric analysis is performed as shown in Figure 1.

In Figure 1, the solid black line represents the profile silhouette of the sensor, and the dotted black line represents the sensor after vertical rotation at angle θ . Additionally, the dimension labeled as “ z ” is the z axis displacement, and the dimension labeled as “ y ” is the y axis displacement occurring when the sensor executes the rotation. Therefore:

$$y' = \text{Axis Length} * \sin(90^\circ - \theta) \quad (1)$$

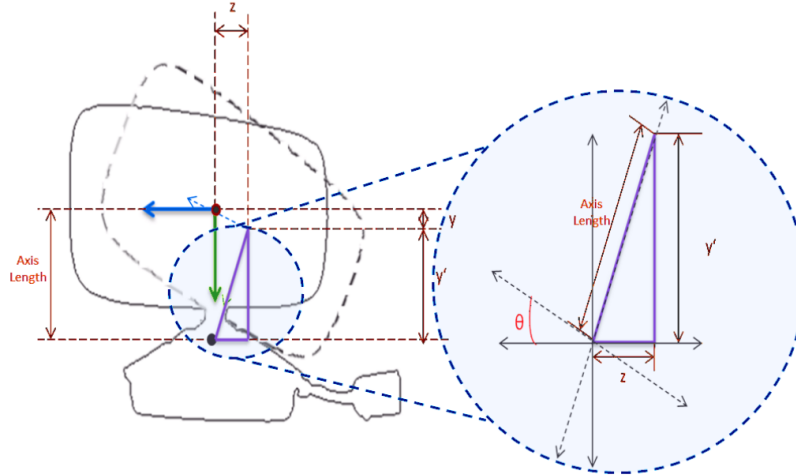


Figure 1. Geometry used to deduce the translation vector of the transformation matrix.

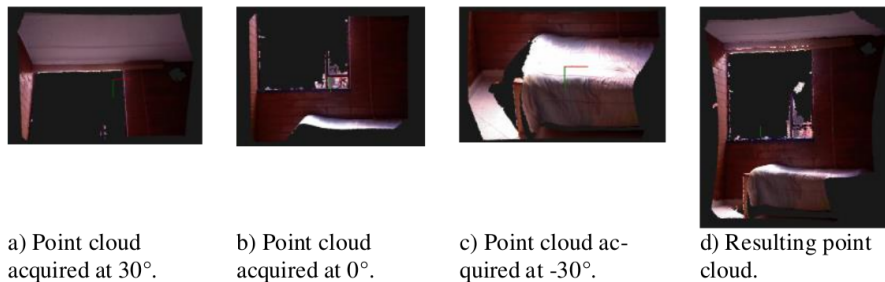
$$y = Axis\ Length - y' \tag{2}$$

$$z = Axis\ Length * \cos(90^\circ - \theta) \tag{3}$$

Then, the transformation is executed according to the following matrix transformation:

$$T_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\theta) & -\sin(\theta) & y \\ 0 & \sin(\theta) & \cos(\theta) & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{4}$$

For instance, the resulting point cloud obtained through the transformation of the point clouds captured at 30° (Figure 2(a) and -30° (Figure 2(c)) to the coordinate frame at (0°) (Figure 2(b)). The registered cloud is shown in Figure 2(d).



a) Point cloud acquired at 30°.

b) Point cloud acquired at 0°.

c) Point cloud acquired at -30°.

d) Resulting point cloud.

Figure 2. Vertical sweep.

Because the internal motor of the sensor does not allow the performance of horizontal sweeps, a simple structure that has markings at each 10° and that is rotated manually was designed for this purpose. When these rotations are made (being γ the rotation angle), there is no displacement vector; consequently, the matrix transformation used to perform this sweep is represented as follows:

$$T_x = \begin{bmatrix} \cos(\gamma) & 0 & \sin(\gamma) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin(\gamma) & 0 & \cos(\gamma) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

After this last transformation, the point clouds compose a single scene that is ready to be processed. Then, to summarize the process to obtain this single scene, the first step is to accomplish multiple vertical sweeps at different horizontal angles to obtain all desired views of the scene. At the same time, the vertical sweep is being performed, and the point clouds grabbed are being transformed using Equation 4. Then, with these clouds obtained from the vertical sweeps (Figure 3a-3c), a horizontal transformation is carried out by using Equation 5, to obtain a point cloud as show in Figure 3d.

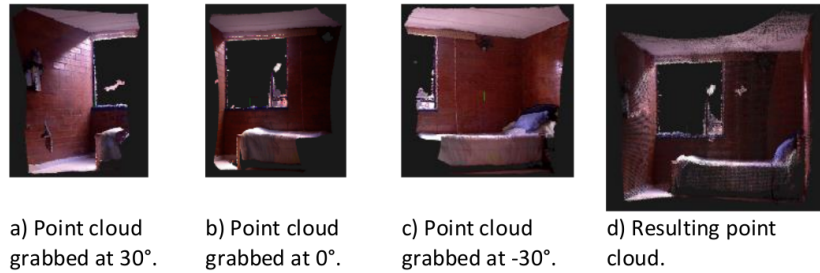


Figure 3. Horizontal sweep.

3. Classification of basic structures

The classification is performed considering the position of each of the segments related to the coordinate frame of the point cloud and also considering the relationships among them. For instance, both ceiling and floor have their normal on the vertical axis, are parallel, and have the biggest and the smallest centroid position on that axis among all the other planes. The proposed methodology is presented in Algorithm I.

3.1. Preprocessing

The point cloud pre-processing is carried out in three steps. First, we remove outliers. Second, we perform a VoxelGrid filtering in order to reduce the number of points to be analyzed [29]. Finally, to smooth and resample noisy data, a smoothing process based on Moving Least Squares (MLS) is used. This smoothing process uses a KDTree method to search and set a neighborhood within a determined radius; then, through MLS, normal vectors are calculated, and a polynomial high order

Algorithm I. The proposed methodology for semantic segmentation of indoor environments.

| | |
|----------------|---|
| Input | Point Cloud of an Indoor Scene (<i>PoC</i>). |
| Step 1 | Preprocess of <i>PoC</i> and returned as <i>PCs</i> . |
| Step 2 | Segmentation of <i>PCs</i> in a set of <i>n</i> r regions <i>R</i> , by using Region Growing Segmentation. |
| Step 3 | Segmentation of <i>R</i> on a set of <i>P</i> planes by using Random Sample Consensus (RANSAC). |
| Step 4 | Characterization of each one of the <i>n</i> planes in <i>P</i> , by determining its normal vector, its centroid, and its minimum and maximum point in each of the axes: <i>x</i> , <i>y</i> , and <i>z</i> . |
| Step 5 | Classification of the ceiling and the floor planes from <i>P</i> , according to their normal and centroid information. |
| Step 6 | Classification of the planes in <i>P</i> in a set of walls (<i>Walls</i>), according to some contextual relationships of their features. |
| Step 7 | Segmentation of each one of the walls in <i>Walls</i> on subsets of lines <i>Lines</i> , by using RANSAC. |
| Step 8 | Characterization of each one of the lines in <i>Lines</i> , according to some relations between them. |
| Step 9 | Classification of doorways by using results of Step 7 and some contextual relationships. |
| Step 10 | Classification of windows by using results of Step 7 and some contextual relationships. |
| Output | Labeling point cloud (<i>PoCL</i>). |

interpolation is carried out [29]. Figure 4b shows a smoothed point cloud of the tested data depicted in Figure 4a.

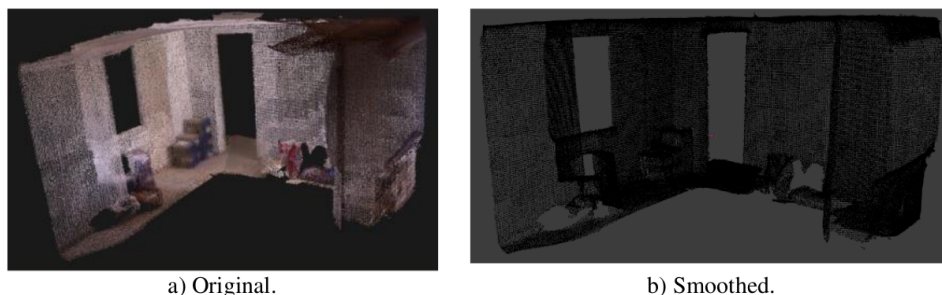


Figure 4. Test point cloud.

3.2. Data segmentation and feature extraction

After a point cloud is filtered, voxelized and smoothed, the following step is to segment the point cloud to find the boundaries of the objects or structures that integrate the 3D cloud. Cloud features are extracted and used to find the mentioned structures faster and separately.

3.2.1. Region Growing Segmentation

The Region Growing Segmentation (RGS) method is an algorithm that merges the points that are close enough in terms of the smoothness constraint [29]. This method begins by designating a seed value to the point with minimum curvature (PC_{s_0}), in the evaluated neighborhood. The curvature κ is calculated as the rotation speed of the plane tangent (T) to the point ($\kappa = ||dT/ds||$). Then, the region A grows with the P_t point ($A \leftarrow A \cup P_t$) until there is an abrupt change (the symbol $A \setminus P_t$ means to add the point P_t to the region A) This abrupt change occurs when the curvature value of the analyzed point is less than the threshold value ($\kappa(P_t) < C_{th}$); this point is then added as a new seed ($S_c \leftarrow S_c \cup P_t$), and the current seed is no longer one of these seeds. The process then starts again.

The threshold values of curvature and angle are defined empirically through experimentation.

The definition of these values is very important to obtain a good performance from the method. The threshold values were varied to determine which values show the best results in the segmentation. The curvature threshold value was arbitrarily stated (the fixed value was 1.0), and the angle threshold was fitted over this curvature. For instance, the number of clusters that must be found by RGS for the point cloud in Figure 4a. is 33. Thus, according to the results depicted in Figure 5, the optimal value chosen for the angle threshold is 3.5° . These values are applicable to all the datasets because they were grabbed and processed in the same way.

Figure 5 shows that when the angle threshold is reduced an over-segmentation occurs because the algorithm is more sensible (Figure 6a). When the angle threshold is increased, the majority of the points are not assigned to a segment (Figure 6b). All red points observed in Figure 6 are those points that are not clustered in a segment. With the appropriate threshold values, the resulting segmentation for the point cloud shown in Figure 4a. is the point cloud of Figure 7a. A total of 33 clusters were found.

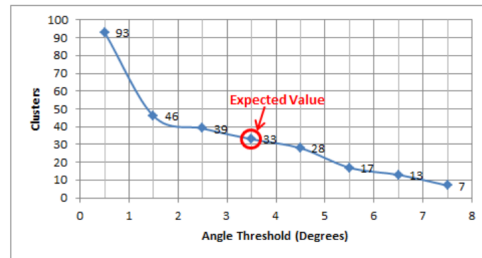
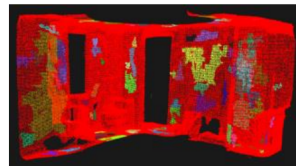
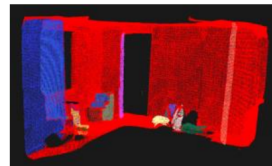


Figure 5. Angle threshold vs. number of clusters.

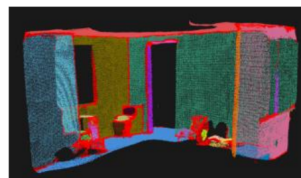


a) Decreasing the angle threshold.

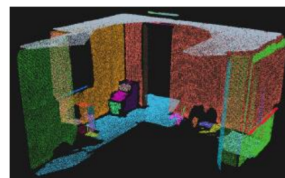


b) Increasing the angle threshold.

Figure 6. Obtained segmentation.



a) Original segmentation.



b) Final segmentation with fitted planes.

Figure 7. Data segmentation

3.2.2. Random Sample Consensus (RANSAC) plane segmentation

This method was selected because of the flatness of ceilings, floors and walls. The first proposal was created to segment the point clouds directly using RANSAC plane segmentation over the pre-processed cloud. However, as RANSAC method finds geometrical planes (planes extending to

infinity), it can take points belonging to other planes due to the intersection that occurs among them. Furthermore, these planes are not very accurate and may be identified as a single plane, when there are actually two or three planes. For this reason, a solution was developed to combine this method with RGS.

We combined RANSAC with RGS instead of simply using RGS because RANSAC not only helps us to segment the regions that RGS kept mistakenly joined, but also helps us to obtain features of these segments by obtaining the plane coefficients that represent each one of them. RANSAC finds all the points that fit a plane based on distance criteria. When RANSAC attains to fit a set of points to the plane model, these coefficients correspond to the coefficients a , b , c , and d of the general equation of the plane (Equation 6). The process is iterative and has a minimum amount of data to fit the model. Finally, when all points have been fitted to a model, a set of planes P is created, where $P = p_i$ and $i = 1, \dots, n$.

$$ax + by + cz + d = 0 \quad (6)$$

Every time a plane is found, the points that fit in the model are projected to this plane to improve the visualization of the model. The resulting point cloud is presented in Figure 7b. Each of the walls, floors, ceilings, and even planes of present objects inside the scene are segmented and identified with different colors. The resulting point cloud is cleaner due to the projection obtained.

3.2.3. Characterization of the planes

The classification of all the structures is accomplished based on contextual relationships and their position related to the coordinate frame. For instance, both floor and ceiling have their normals in the y axis and walls are orthogonal to them (Manhattan structure). Therefore, finding the normal vector of each one of the segments is important for the classification step. Additionally, location and size planes help to determine if they are just part of the objects inside the scene or if they are the structures that we are looking for.

Hence, the features used are as follows: *i*) Coefficients a , b , and c for each one of the n planes found through the RANSAC plane segmentation (according to eq. 6). Where a , b , and c are the normals of the plane $p_i = \vec{N}_i = [a, b, c]$ or $\vec{N}_i = [n_{xi}, n_{yi}, n_{zi}]$. *ii*) Centroid of each one of the n planes, where c_x is the centroid of a plane in the x axis, c_y in the y axis, and c_z in the z axis: $\vec{C}_i = [c_{xi}, c_{yi}, c_{zi}]$. *iii*) Maximum and minimum points of the planes in each axis of the coordinate system. \vec{Min}_i is the vector of the minimum points, and \vec{Max}_i is the vector of the maximum points: $\vec{Min}_i = [m_{xi}, m_{yi}, m_{zi}]$ and $\vec{Max}_i = [M_{xi}, M_{yi}, M_{zi}]$.

3.3. Floor and ceiling classification

Due to the position in which the reference system of the scenes is located, the classification of floor and ceiling is carried out using the normal and centroid information. Both ceilings and floors, as stated above, have their normal on the y axis, and their centroids on this axis are the lowest and the highest among all the others, correspondingly. Therefore, those planes obtained by using RANSAC, that meet these conditions are labeled as ceiling and floor, respectively.

3.4. Wall classification

To classify and label certain planes, such as walls, the features used were contextual features, where it was assumed that they are always orthogonal to the floor and to the ceiling and that they have contact with both the floor and ceiling (Manhattan indoor structure [10]). A contact threshold of 10cm is established. This threshold is created because when the RGS is applied, it is not possible to cluster the borders of each one of the planes accurately. Therefore, the borders are not assigned to any cluster, and a small distance between the floor and walls, and between the ceiling and walls is generated.

After identifying some walls and occlusions, the walls are grouped based on their location and position with respect to the coordinate frame. All walls with their normal on the x axis and their centroid located at the positive side of this axis are grouped and counted. In the same way, all walls that have their normal in x as well and have their centroid located on the negative side of the x axis are grouped. The same procedure is carried out with walls that have their normal on the z axis; they are grouped depending on the side where their centroid is located, and the number of walls classified in these groups is counted. This clustering allows us to identify whether there is a wall that was not labeled as a wall because it is not possible to identify an occlusion on a side where there is not a wall. Therefore, if an occlusion is found on a side where there is no wall, it is probable that this occlusion is really a wall, its label is changed, and it is classified as a wall. In this way, the number of walls increases.

When all the walls have been identified, the next step is to project into the walls all the remaining occlusions to avoid future non-existent holes in walls that can later generate wrong classifications. In addition, due to fact that the RGS method classifies as different planes those that are totally divided by a hole generated, for example, by an opened door, an algorithm that clusters these types of walls into a single wall is created. Thus, the number of walls can be reduced.

The semantics used to represent the structures classified are as follows: walls are represented in green, floors in blue and ceilings in orange. The classification result is shown in Figure 8.

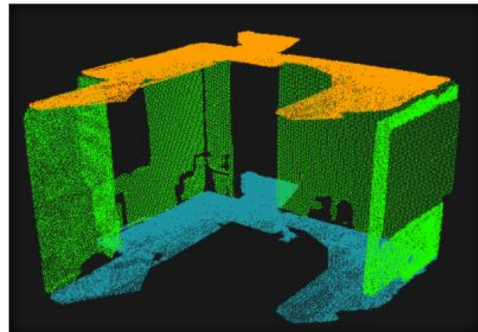


Figure 8. Basic structures of a classified indoor scene.

4. Doorway and window classification

To reduce the classification time for doors and windows, this process is carried out after labeling the basic structures. If walls are labeled, the searching for doors and windows can be performed in fewer planes because the doors and windows will only be located in the walls. It is important to highlight that only open doors or doors at a different level of the wall will be classified.

4.1. Wall segmentation

In finding and labeling doorways and windows, only the planes labeled as walls are segmented. By means of contextual relationships, doorways and windows are not commonly known to be located in ceilings and floors. Because the Kinect has an infrared sensor to measure depth and glass is not able to reflect the infrared spectrum, the windows in indoor scenes are not acquired. In this way, both windows and doorways are observed as holes in the walls. Therefore, the challenge results in finding holes that can be doorways or windows.

Before starting with the segmentation process, the borders of the walls were found by calculating each one of their concave hulls and then applying the RANSAC line segmentation method. A large quantity of lines is obtained, and the lines that do not describe the borders accurately are to be eliminated. For instance, if the concave hull of a wall contains the points shown in Figure 9a, the segmentation obtained is the one shown in Figure 9b. It is, therefore, necessary to eliminate all those lines that are not parallel or orthogonal to the floor.

The elimination process is accomplished by finding the angle between each one of the lines and the normal of the floor. If the angle is different from 0° , 90° , 180° , or 270° , with a permissible deviation, the line is eliminated (Figure 9c).

Furthermore, all the lines that represent the intersection between two planes (two walls), are added to this set of lines, to ensure the possibility of finding doors that are not contained in a plane but are on the border of a plane. The only condition is that in order to add these lines to the found set, they must have contact with points of the cloud in a maximum radius of 10 cm, because we might have a scene that was not grabbed at 360° or a scene in which the indoor geometry does not have a quadrangular shape (Manhattan assumption). The radius of 10 cm is fixed because, even if the shape of the room is quadrangular, there is a distance between planes generated by the RGS process, as was already explained.

RANSAC lines often find two or more lines that describe the same segment, something that is not practical because it can generate over-segmentation of the regions. For this reason, lines that are very close to each other are also eliminated, obtaining a total of nl number of lines.

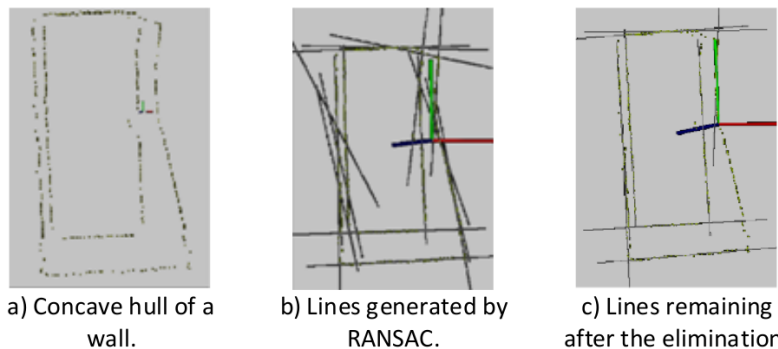


Figure 9. Wall segmentation.

4.2. Characterization of segmented walls

All remaining lines are intersected with each other. These intersections are used to define the distance between two parallel lines; for instance, to measure the gap between two parallel lines, the intersection points that they have with a common line are taken and compared by measuring the distance between them. This measure is also the distance between both lines. The features taken into account for both doorways and windows were as follows: *i*) The distance between parallel lines that describe the width of the doorway or the window. If a wall has its normal on the x axis: $D_W = |pnt_{Ax} - pnt_{Bx}|$, where pnt_{Ax} is the point on the x axis in which the line **A** intersects a line **C**, and pnt_{Bx} is the point on the x axis in which the line **B** intersects a line **C**. If a wall has its normal on the z axis: $D_W = |pnt_{Az} - pnt_{Bz}|$, where pnt_{Az} is the point on the z axis in which the line **A** intersects a line **C**, and pnt_{Bz} is the point on the z axis in which the line **B** intersects a line **C**. *ii*) The distance between parallel lines that describe the height of the doorway or the window: $D_h = |pnt_{Ay} - pnt_{By}|$, where pnt_{Ay} is the point on the y axis in which the line **A** intersects a line **C**, and pnt_{By} is the point on the y axis in which the line **B** intersects a line **C**. *iii*) The number of points inside each one of the rectangles. An additional feature used for window classification was: Position of the upper rectangle edge on the y axis: $Pos = pnt_y$, where pnt_y is a point on the y axis belonging to a line of the upper edge of a rectangle.

4.3. Doorway classification

To create some rectangles and classify them as doorways, the features found were used considering contextual relationships and common features among common doorways. Regularly, in common indoor scenes, doorways have a minimum height of 1.8 m and a maximum height of 2.3 m ($1.8 \leq Dh \leq 2.3$). In the same way, doorways have a minimum width of 0.6 m and a maximum width of 1 m ($0.6 \leq Dw \leq 1$). For these reasons, all pairs of lines that have these distances between them are mixed to create rectangles that are saved as those that describe possible doorways.

The last step to classify these rectangles is to count each one of their inside points. Ideally, a rectangle that represents a doorway should not have points inside, but because the lines found do not accurately describe the edge of the point

cloud, a threshold of 15% is defined. Therefore, a rectangle that has less than 15% of its area full of points is classified as a doorway. These rectangles are saved in a matrix called Door with size nd .

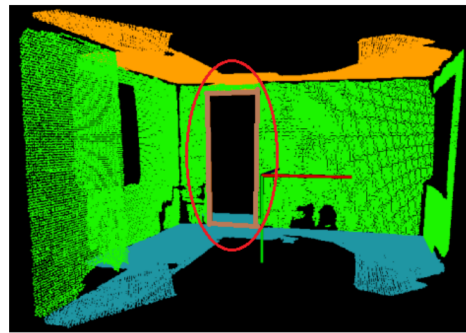


Figure 10. Rectangle classified as a doorway.

Sometimes, the process results in various representations for a single doorway. To solve this problem, a grouping is carried out by considering the following parameters: area, number of vertical lines in common, and percentage of area full of points. In this way, all the nd rectangles are analyzed by pairs. If the rectangles have a line in common or one of them is inside the other, the

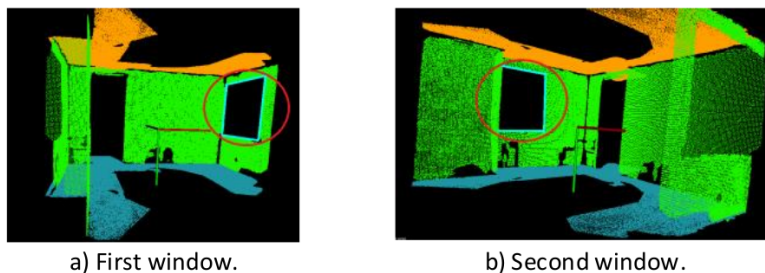


Figure 11. Classified windows.

rectangle with the greatest percentage of points inside is eliminated as a doorway, and the number nd is decreased. In the case of the point cloud shown in Figure 4a, the doorway classification gives as a result the point cloud shown in Figure 10. The brown lines are the semantics used to show a doorway, and a red circle is added to highlight the doorway.

4.4. Window classification

Similar to the doorway classification process, to create some rectangles and classify them as windows, window size restrictions and position restrictions are defined. In the case of windows, there is not a maximum size restriction but there is a minimum size restriction. A common window has a minimum height and width of 0.3 m , where $Dh \geq 0.3$, and $Dw \geq 0.3$, and their upper edge is always above the centroid in the y axis of the wall: $Pos < c_{ywall}$. All pairs of lines that meet these features are combined to create rectangles that are saved as if describing possible windows. The condition $Pos < c_{ywall}$ is established because in a common indoor scene, a window always has its upper edge nearer to the ceiling than to the floor. Otherwise, the rectangle could be a result of an occlusion. As in doorway classification, a counting of points inside each one of the rectangles is also performed, and the percentage allowed is the same. The only step previous to classifying a rectangle as a window is to check that none of the lateral lines of this rectangle belongs to another rectangle classified as a doorway. With the selected rectangles, the clustering is executed following the same principles as door clustering. Figure 11 shows the windows obtained for data in Figure 4a.

5. Results

Tests were performed using a 2.6 GHz Intel Core 2 Duo processor computer with 4GB RAM, running an Ubuntu 12.10 operating system. The sensor used to grab the point clouds was a Microsoft Kinect Sensor for XBOX 360. The libraries used were Libfreenect for Kinect's hardware handling, Point Cloud Library PCL 1.7 for point cloud processing [30], Eigen 3.2.0 and OpenCV libraries for matrix and vector operations, and the Visualization Toolkit VTK 5.8 for image visualization.

The initial sensor position relative to the environment is at 0° , both horizontally and vertically, so that the sensor is facing a wall at a 90° angle. Furthermore, the Kinect is located approximately at mid-height of the scene to ensure that both floor and ceiling are captured. The system could be

mounted in a mobile robot, a Robotino for example, to improve the data acquisition and enlarge its application.

The algorithm was tested in 24 scenes which contained 24 floors, 24 ceilings, 90 walls, 28 doorways and 20 windows. The global process applied after the data collection is: *i*) Pre-process the Point Cloud; *ii*) Segment the pre-processed Point Cloud; *iii*) Characterize each one of the segments obtained in Step *ii*); *iv*) Classify the ceiling and floor; *v*) Classify the walls; *vi*) Segment the walls; *vii*) Characterize the wall segments; and *viii*) Classify doors and windows.

Some classifications that were carried out are shown in figure 12-15. Figure 12 is the point cloud of a bedroom that has one window on a wall that is occluded by a bed. Figure 13 is a kitchen with one doorway and one window; the wall of the window is also occluded. Figure 14 is the image of a hall with two doorways. Figure 15 is another hall that has one doorway and one window divided by a window frame; this is why the algorithm identifies two windows.

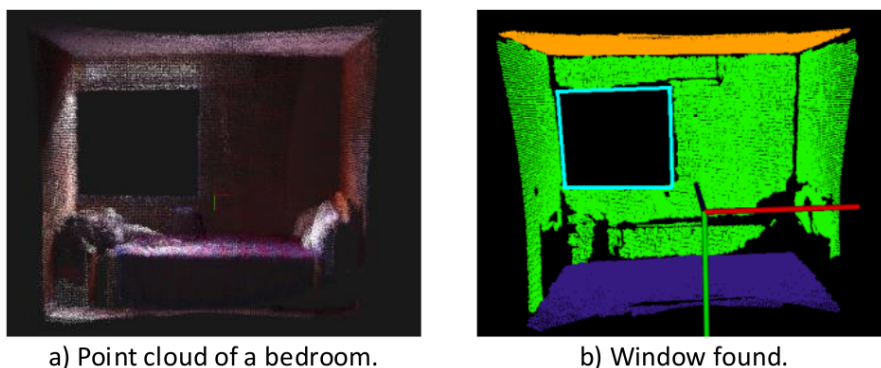


Figure 12. Classification example 1.

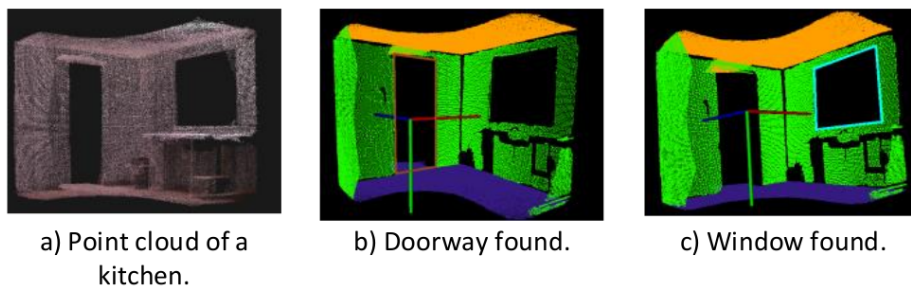


Figure 13. Classification example 2.

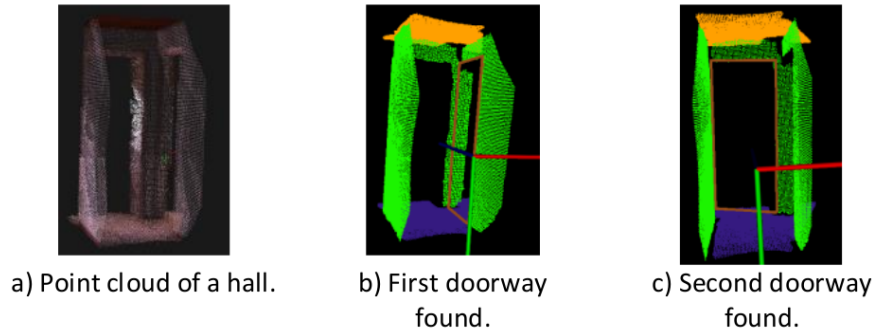


Figure 14. Classification example 3.

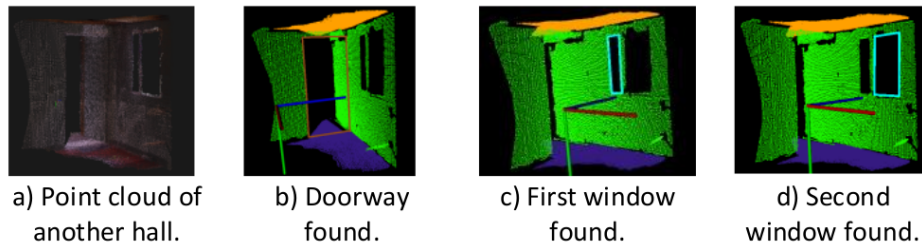


Figure 15. Classification example 4.

After developing the tests by using each one of the 24 scenes, the results obtained are shown as a confusion matrix (Table I), where a complete success in elements such as ceilings and floors was achieved. Notation in Table I is: Doorways (Dw), Windows (Wd), Walls (Ws), Ceilings (C), Floors (F), and Not classified (NC).

| | Dw | Wd | Ws | C | F | NC |
|----|----|----|----|----|----|----|
| Dw | 26 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 |
| Wd | 0 | 18 | 0 | 0 | 0 | 2 |
| Wa | 0 | 0 | 86 | 0 | 0 | 4 |
| C | 0 | 0 | 0 | 24 | 0 | 0 |
| F | 0 | 0 | 0 | 0 | 24 | 0 |
| NC | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

The information registered in Table I is represented as True Positive (TP), False Positive (FP), True Negative (TN), and False Negative (FN) results, obtaining a total element number (N). These results are provided in Table II. Then, this information is used to evaluate the classifier (see Table III). The evaluated aspects are as follows: *i*) Average error, the proportion of misclassification; *ii*) Precision, the proportion of cases that were correctly accepted; *iii*) Recall or Sensitivity, the proportion of true acceptance or the proportion of true positive elements; *iv*) Specificity, the proportion of true rejection or the proportion of true negative elements; *v*) False positive rate, the proportion of false acceptance; and *vi*) Accuracy, the accuracy of the classifier.

As mentioned above, the best results were obtained with ceilings and floors, reaching a precision of 100%, although the results obtained for the other structures were also satisfactory. In this way, when averaging of the algorithm performance, a precision of 99.03% and a recall of 95.68% were

Table II. Criteria for the classifier evaluation of each one of the structures

| | Dw | Wd | Ws | C | F |
|-----------|-----|-----|-----|-----|-----|
| TP | 26 | 18 | 86 | 24 | 24 |
| FP | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| FN | 2 | 2 | 4 | 0 | 0 |
| TN | 159 | 168 | 97 | 164 | 164 |
| N | 188 | 188 | 188 | 188 | 188 |

Table III. Classifier evaluation for each one of the structures

| | Dw | Wd | Ws | C | F |
|----------------------|--------|--------|--------|------|------|
| Average error | 1.60% | 1.06% | 2.66% | 0% | 0% |
| Precision | 96.30% | 100% | 98.85% | 100% | 100% |
| Recall | 92.86% | 90% | 95.56% | 100% | 100% |
| Specificity | 99.38% | 100% | 98.98% | 100% | 100% |
| FP rate | 0.62% | 0% | 1.02% | 0% | 0% |
| Accuracy | 98.40% | 98.94% | 97.34% | 100% | 100% |

obtained. To give a qualitative idea of where the proposed method is located in relation to similar works, tables IV and V are presented, which illustrate different characteristics of the proposed methodology.

Because the classification was based on the contextual relationships among the structures with Manhattan assumption [10], errors found were due to: noise, scenes that have walls that are not orthogonal; and an incorrect data collection. Taking into account all these errors, their source, and the features that the scenes need to fulfill to be correctly identified, it is projected to extend the types of indoor scenes to be labeled in future work. It is possible to fit the algorithm to identify all the environments in which the ceiling is not parallel to the floor. This identification would be possible by eliminating the condition that the ceiling has its normal vector on the y axis and by adding both its centroid on the y axis and its minimum on the y axis, which are the smallest among the features of the other planes. Additionally, the projection of occlusions can be improved if they are projected in the point in which an imaginary ray from the sensor intersects with the planes identified as walls. Finally, the labeling of other objects is possible if all of those that were not labeled and that have some relationships among them are analyzed. For instance, planes parallel to the floor that are not labeled as ceilings can be the top of a table under some contextual relationships.

Table IV. Characteristics of some semantic labelled systems Part I.

| Paper | Classes | Sensor | Processor Computer | Processing time | | Point cloud register | Features |
|--|---|---------------|--------------------------|-----------------|------------|-------------------------------------|--|
| | | | | Cloud Size | Time (sec) | | |
| Using Context to Create Semantic 3D Models of Indoor Environments [1] | Wall, Ceiling and Floor | Scanner laser | - | - | - | Through the use of fiducial markers | Are, Patch orientation, Height, Orthogonality, Parallelism, Adjacency and Coplanarity |
| Automatic creation of semantically rich 3D building models from laser scanner data [2] | Wall, Ceiling, Floor, Window and doorway (partially occluded) | Scanner laser | - | - | - | Manual registration | Orthogonality, Parallelism, Occupancy, Area, Aspectratio, Size relative to encompassing surface and Distances from the sides of a rectangular area to the edges of the surface |
| 3D Modeling of Indoor Surfaces with Occlusion and Clutter [17] | Wall, Floor, Ceiling and Obstacle | Scanner laser | 2.6 GHz Intel Core 2 Duo | 25470 | 13.7 | - | Adjacency, Parallelism, Intersection and Overlapping |
| Our proposal | Wall, Ceiling, Floor, Window and Doorway (partially occluded) | Kinect | 2.6 GHz Intel Core 2 Duo | 583052 | 10.14 | Geometric transformation | Patch orientation, Patch centroid, Patch maximum and Minimum, Line parallelism, Distances between parallel |

Tabla V. Characteristics of some semantic labelled systems Part II.

| Methodology | | | | | | |
|--|-------------------------|---|------------------------------------|--|---|---|
| Paper | Pre-process | Planes detection and segmentation | Classification of basic structures | Opening detection | Classification of door ways and windows | Number of test point cloud |
| Using Context to Create Semantic 3D Models of Indoor Environments [1] | Voxelization | Growing Region, Rectangle with the minimum surrounding area, and Total Least Squares(TLS) | Conditional Random Field (CRF) | It does not apply | It does not apply | 9 Scenes 81 Walls 11 Floors 10 Ceilings |
| Automatic creation of semantically rich 3D building models from laser scanner data [2] | Voxelization | Growing Region, Rectangle with the minimum surrounding area, and Total Least Squares(TLS) | Stacking algorithm | Range Images and Rectangle detection through Hough | Support Vector Machine(SVM) | 13 Scenes |
| 3D Modeling of Indoor Surfaces with Occlusion and Clutter [17] | Outlier elimination | Convex Hull | Contextual relationships | It does not apply | It does not apply | - |
| Our proposal | Voxelization and Smooth | Growing Region, RAN-SAC planes and Projection | Contextual relationships | Concave Hull, RANSAC Lines and Rectangle forming | Contextual relationships | 24 Scenes 90 Walls 24 Floors 24 Ceilings 28 Door-ways |

The proposed system is designed to classify and label walls, ceilings, floors, doorways with open doors, doorways with closed doors recessed into walls, and partially occluded windows. However, there may be scenarios with doors to the level of the wall, curtained windows or glass walls. The system should be modified to have proper operation in such cases. In the first two cases, because the depth of objects does not change, i.e. the door or curtain are considered to be at the same level of the wall, but there is a change in texture or color, the modification would be to incorporate to the system color or texture descriptors, obtained from the image analysis. To deal with situations with glass walls, given that this material has properties of non Lambertian reflectance, the reconstruction technique of the scene should be modified. In [31] some of these reconstruction techniques are reviewed.

6. Conclusions

This paper presents a new method for semantic labeling of indoor scenes. The methodology that has been presented assumes a Manhattan indoor structure and is based mostly on contextual relationships among the objects, such as parallelism, orthogonality, window and doorway position related to the walls, and usual heights and widths of windows and doorways. The classification and labeling were performed without the need for a classifier that requires both training and a large amount data for that purpose. They were performed with contextual rules that allow an easy understanding of the process and also an identification of the reasons why there are some errors in labeling.

Furthermore, the data were captured with a low-cost sensor with a low resolution, and the com-

puter employed to perform the tests has a processor that is below the standard. Although the algorithm can be tied to the way in which the data were collected, both the accuracy of labeling and processing time are satisfactory, and the computational requirements are closer to real time.

The next step is to continue with the improvement of this system. Firstly, making it less dependent on data collection and enlarging the objects or structures that can be identified, and particularly expanding the structures of indoor environments to structures that do not meet the Manhattan assumption. Secondly, assembling the acquisition system in a mobile robot.

References

- [1] Xuehan Xiong and Daniel Huber, Using Context to Create Semantic 3D Model of Indoor Environments. *Proceedings of the British Machine Vision Conference*, 2010, pp. 1-11.
- [2] Xuehan Xiong, Antonio Adan, Burcu Akinci and Daniel Huber, Automatic creation of semantically rich 3D building models from laser scanner data. *Automation in Construction*, Volume 31, May, 2013, pp. 325-337.
- [3] Lei Shi, Sarath Kodagoda and Ravindra Ranasinghe, Fast indoor scene classification using 3D point clouds, *Proceedings of Australasian Conference on Robotics and Automation (ACRA)*, 2011.
- [4] Lei Shi, Sarath Kodagoda and Gamini Dissanayake, Laser range data based semantic labeling of places, *International Conference on Intelligent Robots and Systems (IEEE/RSJ)*, 2010, pp. 5941-5946.
- [5] Radu Rusu, Zoltan Marton, Nico Blodow, Andreas Holzbach and Michael Beetz, Model-based and learned semantic object labeling in 3D point cloud maps of kitchen environments. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2009, pp. 3601-3608.
- [6] Leydy Muñoz, Edilson Quiñónez y Héctor Victoria, Reconstrucción 3D de objetos sumergidos en aguas limpias. *Ingeniería*, Vol. 18, NO. 2, pp.36-53.
- [7] Julien Valentin, Vibhav Vineet, Ming Cheng, David Kim, Jaime Shotton, Pushmeet Kohli, Matthias Niessner, Antonio Criminisi, Shahram Izadi and Philip Torr, SemanticPaint: Interactive 3D Labeling and Learning at your Fingertips. *ACM Transactions on Graphics*, Volume 34, Number 5, 2015.
- [8] Seong Park and Ki Hong, Recovering an indoor 3D layout with top-down semantic segmentation from a single image. *Pattern Recognition Letters*, Volume 68, Part 1, December 2015, pp. 70-75.
- [9] Sid Bao, Axel Furlan, Li Fei and Silvio Savarese, Understanding the 3D layout of a cluttered room from multiple images. *2014 IEEE Winter Conference on Applications of Computer Vision (WACV)*, 2014, pp. 690-697.
- [10] Alex Flint, David Murray and Ian Reid, Manhattan scene understanding using monocular, stereo, and 3d features. *2011 International Conference on Computer Vision*, 2011, pp. 2228-2235.
- [11] Erick Delage, Honglak Lee and Andrew Ng, A dynamic bayesian network model for autonomous 3D reconstruction from a single indoor image. *Proceedings of the 2006 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2006, pp. 2418-2428.
- [12] Shi Wenxia and J. Samarabandu, Investigating the performance of corridor and door detection algorithms in different environments. *Proceedings of the International Conference on Information and Automation*, 2006, pp. 206-211.
- [13] Ru0 Zhang, Ping Tsai, James Cryer and Mubarak Shah, Shape-from shading: a survey. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Volume 21, Number 8, 1999, pp. 690-706.
- [14] Hao Wu, Guo Tian, Yan Li, Feng Zhou and Peng Duan, Spatial semantic hybrid map building and application of mobile service robot. *Robotics and Autonomous Systems*, Volume 62, Number 6, 2014, pp. 923-941
- [15] Pooja Viswanathan, David Meger, Tristram Southey, James Little and Alan Mackworth, Automated spatial-semantic modeling with applications to place labeling and informed search. *Proceedings of the Canadian Conference on Computer and Robot Vision*, 2009, pp. 284-291.
- [16] Angela Budroni and Jan Böhm, Automatic 3D modelling of indoor manhattan-world scenes from laser data. *Proceedings of the International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2010, pp. 115-120.
- [17] S.A. Abdul-Shukor, K.W. Young and E. Rushforth, 3D Modeling of Indoor Surfaces with Occlusion and Clutter. *Proceedings of the 2011 IEEE International Conference on Mechatronics*, 2011, pp. 282-287.

- [18] Martin Weinmann, Boris Jutzi, Stefan Hinz and Clément Mallet, Semantic point cloud interpretation based on optimal neighborhoods, relevant features and efficient classifiers. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Volume 105, 2015, pp. 286-304
- [19] Andrés Serna and Beatriz Marcotegui, Detection, segmentation and classification of 3D urban objects using mathematical morphology and supervised learning. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Volume 93, 2014, pp. 243-255.
- [20] Microsoft, *Kinect*, February 2015, [On line], Available on <http://www.xbox.com/en-us/kinect>
- [21] Hema Koppula, Abhishek Anand, Thorsten Joachims and Ashutosh Saxena, Semantic labeling of 3D point clouds for indoor scenes. *Proceedings of the Advances in Neural Information Processing Systems*, 2011, pp. 1-9.
- [22] Xiaofeng Ren, Liefeng Bo, and Dieter Fox, RGB-(D) scene labeling: Features and algorithm. *Proceedings of the 2012 IEEE International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2012, pp. 2759-2766.
- [23] Paul Besl and Neil McKay, A method for registration of 3-D shapes, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Volume 14, Number 2, 1992, pp. 239-256.
- [24] Óscar Mozos, Cyrill Stachniss and Wolfram Burgard. Supervised learning of places from range data using adaboost. *Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2005, pp. 1730-1735.
- [25] Andreas Nüchter and Joachim Hertzberg, Towards semantic maps for mobile robots. *Robotics and Autonomous Systems*, Volume 56, Number 11, 2008, pp. 915-926.
- [26] Alex Flint, Christopher Mei, David Murray and Ian Reid, A dynamic programming approach to reconstructing building interiors. *Proceedings of the 13th IEEE European Conference on Computer Vision*, 2010, pp. 394-407.
- [27] Martin Fischler and Robert Bolles, Random Sample Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography. *Communications of the ACM*, Volume 24, Number 6, 1981, pp. 381-395.
- [28] Open Kinect Project, *Open Kinect*, July 2015, [On line], Available on http://openkinect.org/wiki/Main_Page.
- [29] Point Cloud Library, *Documentation*, March 2015, [On line], Available on <http://pointclouds.org/documentation/tutorials/>
- [30] Point Cloud Library, *What is it?*, September 2015, [On line], Available on <http://pointclouds.org/>
- [31] Ivo Ihrke, Kiriakos N. Kutulakos, Hendrik P. A. Lensch, Marcus Magnor and Wolfgang Heidrich, Transparent and Specular Object Reconstruction. *Computer Graphics Forum*. Volume 29, Number 8, 2010, pp. 2400-2426.

Angie Alexandra Quijano Sarmiento

Ingeniera mecatrónica, Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá; se desempeñó como investigadora en la Universidad Nacional de Colombia durante un año; ejerció el cargo de junior mobile developer en la empresa Domoti S. A. S. donde desarrolló varias aplicaciones móviles tanto para Android como para iOS; actualmente se desempeña como desarrolladora Qt/C++ en la empresa Tic's and System's Solutions, donde desarrolla varios softwares relacionados a visión de máquina y realidad virtual haciendo uso de OpenCV.
Correo electrónico: aaujjanos@unal.edu.co

Flavio A. Prieto O.

Ingeniero Electrónico de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas; físico, Universidad Nacional de Colombia Sede Bogotá; magíster en Ingeniería Eléctrica, Universidad de los Andes; DEA y doctor del Institut National des Sciences Appliquées (INSA) Lyon, Francia y PhD de l'Ecole de Technologie Supérieure (ETS), Université du Québec, Montreal, Canadá; profesor de la Universidad Nacional de Colombia.
Correo electrónico: fprieto@unal.edu.co



Artículo de investigación

REVISTA
Ingeniería

Análisis y Simulación del Comportamiento de Vorticidad para el Modelo de Partícula Auto-propulsada

Analysis and Simulation of Vortex Behavior for Self-propelled Particle Model

Helbert Eduardo Espitia Cuchango¹, Jorge Iván Sofrony Esmeral²

¹Universidad Distrital Francisco José de Caldas., ²Universidad Nacional de Colombia.
Correo electrónico: heespitiac@udistrital.edu.co

Recibido: 16-03-2016. Modificado: 16-06-2016. Aceptado 26-07-2016

Resumen

Contexto: En este documento se realizan varios análisis a un modelo de partículas autopropulsadas; dicho modelo permite describir el comportamiento de grupos de individuos. Se caracteriza por presentar movimientos lineales y circulares los cuales son empleados para la búsqueda de alimento, así como también para evadir obstáculos y depredadores.

Método: Se realizó en primer lugar el cálculo de puntos de equilibrio, posteriormente se observa la conservación de energía y momento angular, finalmente se realiza la estimación del radio de giro de las partículas cuando estas realizan movimientos circulares. Las simulaciones se realizan considerando los análisis de tal forma que se pueden observar las características más relevantes.

Resultados: De los análisis realizados se aprecia que el componente de interacción entre partículas actúa como una fuerza centrípeta dirigida al centro de rotación del enjambre, de tal forma que las partículas pueden describir una trayectoria circular a una velocidad constante.

Conclusiones: Mediante los análisis realizados se identificaron varias características importantes del modelo estudiado, las cuales son presentadas de forma cualitativa con simulaciones. Principalmente se pudo observar la capacidad del modelo para describir movimientos lineales y circulares dependiendo de la configuración de sus parámetros.

Palabras clave: Auto-propulsión, modelo, partícula, vórtice.

Idioma: Español

Open access



Citación: H.E. Espitia, J.I. Sofrony, "Análisis de un Modelo de Partícula Auto-propulsada," INGENIERÍA, vol. 21, no. 3, pp. 324-345, 2016.

© Los autores; titular de derechos de reproducción Universidad Distrital Francisco José de Caldas. En Línea DOI: <http://dx.doi.org/10.14483/udistrital.jour.reving.2016.3.a05>



Abstract

Context: In this paper several analyzes are performed to a self-propelled swarm model; this model permits to describe the swarm behavior. It is characterized by having both, linear and circular movements which are utilized to search nourishment as well as to evade obstacles and predators.

Method: In regard of the analyzes performed, it is first calculated the equilibrium points, then the conservation of energy and angular momentum is observed. Finally, it is performed an estimate of the rotation radius when the particles made circular motions. The simulations were made considering the analyzes in order to observe the most important characteristics of the studied model.

Results: From the analyzes, it is seen that the interaction among particles acts as a centripetal force directed to the rotation center of the swarm, such that the particles can describe a circular trajectory at a constant speed.

Conclusions: Through the analysis some important features of the model were identified, these features were presented via simulations. It was mainly observed the capacity of the model to describe linear and circular movements depending on parameters configuration.

Keywords: Model, particle, self-propelled, vortex.

1. Introducción

El comportamiento de muchos seres vivos está sujeto a la interacción que se presenta con sus vecinos, lo cual es útil tanto para la búsqueda de alimento como también para evadir depredadores. El modelado de estos comportamientos ha sido de atención en áreas como matemática, física, biología e ingeniería. Particularmente, en ingeniería se ha buscado emplear tal comportamiento como inspiración para solucionar problemas de optimización.

En el campo de la biología resulta de importancia el planteamiento de modelos que representen los comportamientos de seres vivos tales como aves, peces, hormigas y bacterias, entre otros. Cuando se trata de comportamientos colectivos se busca modelar las interacciones de los individuos para reproducir comportamientos emergentes; algunos comportamientos que son de resaltar corresponden a la capacidad de los individuos para evadir obstáculos y depredadores.

1.1. Modelos de partículas

Una forma empleada para describir el comportamiento de grupos de individuos corresponde al modelo de partículas activas Brownianas; en particular, con este modelo se busca explotar la característica de la formación de vórtices. Son de resaltar los modelos realizados para describir el comportamiento del zooplancton *Daphnia*, puesto que su desplazamiento le permite evadir obstáculos. El modelo de partícula autopropulsada corresponde a uno de los más representativos del zooplancton *Daphnia*, donde se considera que el individuo posee una fuente interna para lograr desplazarse de forma autónoma [1].

El modelo de partículas autopropulsadas (*Self-Propelled Particles*) fue propuesto para estudiar el

movimiento colectivo de grandes grupos de organismos [2]. Según [1] el movimiento de los individuos se encuentra regido por la interacción entre vecinos. Por su parte, los modelos de partículas autopropulsadas están formados por partículas que interactúan a nivel local mediante un componente de propulsión intrínseca a la partícula [1]. Adicionalmente, el fenómeno de auto-propulsión se observa en procesos físico-químicos, donde se tienen partículas pequeñas con fuerzas superficiales sensibles a ciertas temperaturas y concentraciones químicas [3].

Por otra parte, en [4] y [5] se han realizado análisis sobre el comportamiento de vorticidad asociado a un ciclo límite en su comportamiento dinámico, dicho análisis es realizado para dos partículas en dos dimensiones.

El comportamiento emergente que se estudia en este documento consiste en un movimiento circular de partículas con la formación de un vórtice, ya que esta estrategia de locomoción que emplean algunos seres vivos para buscar alimento y evadir obstáculos puede ser empleada en otros campos para la solución de problemas de búsqueda y exploración.

1.2. Antecedentes

En el presente documento se lleva a cabo el análisis y simulación de un modelo compacto de partículas autopropulsadas que emplea un potencial parabólico de interacción. Este modelo se caracteriza por describir movimientos lineales y circulares; mediante análisis y simulaciones se valida el comportamiento del modelo y el efecto que tienen sus parámetros.

El modelo ha sido utilizado en varios trabajos; en primer lugar, para el planteamiento de un algoritmo de planeación de trayectorias de robots móviles tal como se observa en [6] y posteriormente para el desarrollo de un algoritmo de optimización basado en un enjambre de partículas con comportamiento de vorticidad [7], [8], [9]. La importancia del análisis del modelo para el desarrollo del algoritmo se puede apreciar en [10] y [11]. En estos documentos se ha empleado el modelo considerando análisis parciales; en consecuencia, el objetivo en esta oportunidad consiste en extender tales análisis y simulaciones.

En trabajos futuros, se espera que con dichos análisis se pueda mejorar la selección de parámetros así como también el comportamiento del algoritmo basado en el modelo considerado. Con una buena identificación y análisis de los parámetros del modelo, estos se podrían manipular de tal forma que el enjambre logre realizar procesos de exploración y explotación. El proceso de exploración estaría directamente relacionado con la dispersión que puede lograr el enjambre de partículas y la explotación con la convergencia del enjambre a un determinado punto.

2. Comportamientos de enjambres

En relación a las diferentes conductas que se pueden evidenciar en la naturaleza, las congregaciones de individuos son una temática interesante dados los comportamientos emergentes que se observan [12]. Aquellos han sido estudiados y representados de forma analítica, siendo de resaltar el trabajo presentado en [13] que se enfoca en desarrollar un modelo básico para representar

un enjambre de individuos. Un trabajo relacionado se puede apreciar en [2] donde se describen varios patrones representativos de los enjambres. Adicionalmente, en [12] se hace una revisión del comportamiento colectivo para la formación de enjambres, observando las propiedades de la auto-regulación y algunos principios del comportamiento colectivo como: realimentación positiva, realimentación negativa, dirección, sincronización, integridad, redundancia, umbrales de respuesta, variabilidad, inhibición, egoísmo y variabilidad.

Sobre los diferentes enfoques considerados para modelos de enjambres, en [14] se analiza el efecto que tiene el liderazgo de un individuo; en [15] se consideran las diferentes formas de organización que presentan las aves [15] y en [16] se observa el efecto que tiene incorporar mecanismos de predicción en un modelo de enjambre. Adicionalmente se tiene modelos de enjambres (como hormigas) basados en el proceso de dispersión y detección de feromonas para la comunicación entre individuos, principalmente para la búsqueda de alimento. Un trabajo relacionado se puede apreciar en [17], donde se propone un sistema embebido para la simular el aprovisionamiento de alimentos en colonias de hormigas artificiales.

2.1. Modelos de partículas con comportamiento de vorticidad

El comportamiento de vorticidad es un fenómeno que se presenta con frecuencia en los fluidos y se debe a la interacción que existe entre las fuerzas inerciales y viscosas (se suele cuantificar mediante el número de Reynolds [18]). El fenómeno de vorticidad consiste en el movimiento de forma rotacional (circular) de partículas alrededor de un punto denominado vórtice. En dinámica de fluidos se efectúa el análisis de este fenómeno mediante las ecuaciones de Navier Stokes [19]. Además de los fluidos, este tipo de comportamiento se presenta en enjambres como cardúmenes de peces, bandadas de aves y colonias de bacterias, entre otros. Para modelar este comportamiento se tienen dos enfoques representativos; el primero consiste en el modelo de partícula autopropulsada [20], [21]; en segundo lugar se tiene el modelo de partícula activa Browniana [22]. Este último considera una componente estocástica. Tales modelos suelen incorporar potenciales de Morse a fin de representar la interacción entre individuos; sin embargo, también se pueden observar modelos que emplean un potencial parabólico [23].

Por su parte, en [24] se comenta que los patrones globales de los enjambres se presentan por las interacciones internas de los individuos. También se expone que el comportamiento circular de un solo individuo no constituye un comportamiento colectivo de enjambre.

Sobre algunos enfoques empleados para un modelo de enjambre de partículas se tiene:

- Modelo computacional Boids desarrollado para simular congregaciones de individuos (Craig Reynolds 1986) [25].
- Modelo de interacción de partículas autopropulsadas (*Self-Propelled Interacting Particles*), (Vicsek 1995) [13].
- Modelo de interacción de partículas autopropulsadas con rango largo de atracción y rango corto de repulsión (Levine 2001) [20].
- Modelo de interacción de partículas Brownianas activas con depósitos internos de energía (*Interacting Active Brownian Particles with Internal Energy Depot*) [26], [27], [28].

3. Movimiento activo

En un caso escalar, el movimiento activo se encuentra basado en la ecuación (1), la cual presenta una bifurcación supercrítica con velocidad v igual a cero debajo del punto de bifurcación, siendo el movimiento activo asintóticamente estable con $v = \pm\sqrt{\alpha/\beta}$ [3]. En esta ecuación α y β son parámetros de propulsión y frenado respectivamente.

$$\frac{dv}{dt} = \alpha v - \beta v^3 = (\alpha - \beta v^2)v \tag{1}$$

Considerando que una bifurcación consiste en el cambio de la dinámica y estabilidad del sistema dependiendo de sus parámetros, para la ecuación (1) en estado estable $dv/dt = f = (\alpha - \beta v^2)v = 0$ se tienen las soluciones $v_{e,0} = 0$, $v_{e,1} = \sqrt{\alpha/\beta}$ y $v_{e,2} = -\sqrt{\alpha/\beta}$. Para determinar el tipo de comportamiento que presentan los puntos de equilibrio se emplea el Jacobiano obteniendo:

$$\left. \frac{\partial f}{\partial v} \right|_{v_e, \alpha_e, \beta_e} = \alpha_e - 3\beta_e v_e^2 \tag{2}$$

Del cálculo anterior se aprecia que el valor propio del sistema es $\lambda = \alpha_e - 3\beta_e v_e^2$. A modo de ejemplo, considerando $\beta > 0$ cuando $\alpha < 0$ solo se tiene una solución real igual a $v_e = 0$ la cual es estable; por otro lado, si $\alpha > 0$ se tienen tres soluciones reales: una para $v_e = 0$ la cual es inestable, las otras dos para $v_e = \sqrt{\alpha/\beta}$ y $v_e = -\sqrt{\alpha/\beta}$ las cuales son estables. En la figura 1 se puede apreciar el diagrama de bifurcación para estas soluciones.

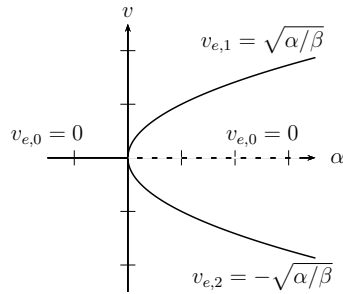


Figura 1. Diagrama de bifurcación. Línea continua para las soluciones estables y línea discontinua para la solución inestable.

La ecuación (1) según [4] corresponde a una aproximación por expansión en series de Taylor para la descripción de un modelo de partículas con un depósito interno de energía. Por otro lado, en [3] se presenta que el comportamiento de auto-propulsión ocurre en procesos físico-químicos, donde se tienen partículas pequeñas con fuerzas superficiales sensibles a concentraciones químicas y temperaturas, presentándose la interacción de fuerzas capilares y viscosas. La capilaridad ocurre cuando las fuerzas intermoleculares adhesivas entre un líquido y un sólido son mayores que las fuerzas intermoleculares cohesivas del líquido. Esto tiene como efecto la

absorción del líquido lo cual puede estar en contra de la fuerza de gravedad [3] (la viscosidad consiste en la propiedad que presenta un fluido para oponerse a deformaciones tangenciales [3]).

4. Modelo de partículas auto-propulsadas

El modelo considerado está formado por la menor cantidad de componentes que permitan describir una forma de locomoción con movimientos circulares. Las ecuaciones del modelo considerado son:

$$\frac{d\vec{r}_i}{dt} = \vec{v}_i \quad (3)$$

$$m_i \frac{d\vec{v}_i}{dt} = \vec{F}_{pro,i} + \vec{F}_{int,i} + \vec{F}_{esp,i} \quad (4)$$

Con la primera ecuación se puede establecer la posición \vec{r}_i de la partícula conociendo la velocidad \vec{v}_i . Mediante la segunda ecuación se puede calcular la velocidad de la partícula conociendo las fuerzas que actúan sobre ella.

La ecuación correspondiente al balance de fuerzas presenta las siguientes componentes:

- Término de inercia $m_i \frac{d\vec{v}_i}{dt}$.
- Componente de fuerzas disipativas y de propulsión \vec{F}_{pro} .
- Término de relaciones entre individuos $\vec{F}_{int,i}$.
- Componente de fuerzas dadas por el entorno \vec{F}_{esp} .

La fuerza de auto-propulsión se considera como:

$$\vec{F}_{pro,i} = (-\alpha + \beta v_i^2) \vec{v}_i \quad (5)$$

El término anterior es similar al presente en la ecuación de Van der Pol, esta ecuación se caracteriza por tener un comportamiento de ciclo límite [29]. Según [21] y [20] cuando se tiene este término, la velocidad de las partículas en estado estable tiende a ser $|\vec{v}_i| = \sqrt{\alpha/\beta}$.

Con el fin de representar la interacción entre individuos, el centro de masa del enjambre corresponde a:

$$\vec{R} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \vec{r}_i \quad (6)$$

El factor dado por las interacciones de partículas se considera mediante un potencial parabólico de la forma [27]:

$$U_{int,i}(\vec{r}_i, \vec{R}) = \frac{a}{2} (\vec{r}_i - \vec{R})^2$$

Mediante este potencial se tienen fuerzas que actúan directamente hacia el centro de masa del enjambre, lo cual permite tener un acople global de las partículas al centro de rotación de estas. Dichas fuerzas se pueden emplear para controlar la cohesión del enjambre. La fuerza de interacción asociada a este potencial es:

$$\begin{aligned} \vec{F}_{int,i} &= -\vec{\nabla} U_{int,i}(\vec{r}_i) = -a(\vec{r}_i - \vec{R}) \\ \vec{F}_{int,i} &= -\frac{a}{N} \sum_{j=1}^N (\vec{r}_i - \vec{r}_j) \end{aligned}$$

La información del entorno o espacio donde se desplazan las partículas se encuentra dada el campo potencial U_{esp} . La fuerza sobre cada partícula que se produce por el potencial U_{esp} es:

$$\vec{F}_{esp,i} = -k_f \nabla U_{esp}(\vec{r}_i) \quad (7)$$

Donde, k_f es un valor escalar que pondera este componente.

5. Análisis del modelo

En esta sección se realizan diferentes análisis y simulaciones con los cuales se muestran las características más relevantes del modelo. En primer lugar se establecen los puntos de equilibrio del enjambre, luego se realiza un análisis de conservación de energía y momento angular, con la finalidad de mostrar que el enjambre es capaz de realizar movimientos circulares. Finalmente se realiza la estimación del radio de giro del enjambre. Con las simulaciones se busca evidenciar las características identificadas mediante el análisis realizado.

5.1. Puntos de equilibrio

Los puntos de equilibrio se pueden establecer como:

$$\frac{d\vec{r}_i}{dt} = 0 \quad (8)$$

$$m_i \frac{d\vec{v}_i}{dt} = 0 \quad (9)$$

es decir

$$0 = \vec{v}_i \quad (10)$$

$$0 = (-\alpha + \beta|v_i|^2)\vec{v}_i - \frac{a}{N} \sum_{j=1}^N (\vec{r}_i - \vec{r}_j) - k_f \vec{\nabla} U_{esp} \quad (11)$$

de lo anterior se tiene que $\vec{v}_i = 0$, por lo cual:

$$\frac{a}{N} \sum_{j=1}^N (\vec{r}_i - \vec{r}_j) + k_f \vec{\nabla} U_{esp} = 0 \quad (12)$$

en el caso que U_{esp} tenga un valor mínimo $\vec{\nabla} U_{esp} = 0$, por lo cual, se tiene $\frac{a}{N} \sum_{j=1}^N (\vec{r}_i - \vec{r}_j) = 0$, es decir, $-a(\vec{r}_i - \vec{R}) = 0$ y finalmente $\vec{r}_i = \vec{R}$. Particularmente de la suposición $\vec{\nabla} U_{esp}|_{\vec{r}_i} = 0$ esto se cumple si $\vec{\nabla} U_{esp}|_{\vec{R}} = 0$, es decir que $\vec{v}_i = 0$ y $\vec{r}_i = \vec{R}$ es un punto de equilibrio.

5.2. Análisis de energía

El análisis de estabilidad se hace considerando el procedimiento empleado en [30]. Partiendo de la ecuación dinámica del modelo:

$$m_i \frac{d\vec{v}_i}{dt} = (\alpha - \beta v_i^2)\vec{v}_i - \frac{a}{N} \sum_{j=1}^N (\vec{r}_i - \vec{r}_j) - k_f \vec{\nabla} U_{esp,i} \quad (13)$$

En primer lugar se realiza el cálculo de la energía cinética T_i y potencial U_i para una partícula de tal forma que se tiene:

$$T_i = \frac{1}{2} m_i v_i^2 \quad (14)$$

$$U_i = U_{int,i} + k_f U_{esp,i} \quad (15)$$

Tomando la derivada de la energía total $E_i = T_i + U_i$:

$$\frac{d}{dt}(T_i + U_i) = \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} m_i v_i^2 + U_{int,i} + k_f U_{esp,i} \right) \quad (16)$$

$$\frac{d}{dt}(T_i + U_i) = m_i \vec{v}_i \cdot \frac{d\vec{v}_i}{dt} + \vec{v}_i \cdot a \sum_{j=1}^N (\vec{r}_i - \vec{r}_j) + \vec{v}_i \cdot k_f \vec{\nabla} U_{esp,i} \quad (17)$$

De la ecuación (13) es posible calcular:

$$m_i \vec{v}_i \cdot \frac{d\vec{v}_i}{dt} = \vec{v}_i \cdot (\alpha - \beta v_i^2) \vec{v}_i - \vec{v}_i \cdot \vec{\nabla} U_{int,i} - \vec{v}_i \cdot k_f \vec{\nabla} U_{esp,i} \quad (18)$$

Sustituyendo la ecuación (18), en (17) se obtiene:

$$\frac{d}{dt}(T_i + U_i) = \vec{v}_i \cdot (\alpha - \beta v_i^2) \vec{v}_i \quad (19)$$

Sumando las contribuciones de todas las partículas:

$$\frac{d}{dt}(T + U) = \sum_{i=1}^N \vec{v}_i \cdot (\alpha - \beta v_i^2) \vec{v}_i \quad (20)$$

De lo anterior se tiene que el enjambre de partículas se encuentra en un estado de energía constante si:

$$\sum_{i=1}^N \vec{v}_i \cdot (\alpha - \beta v_i^2) \vec{v}_i = 0 \quad (21)$$

Por lo tanto, se puede tener un estado de equilibrio cuando $v_i = 0$ o $v_i = \pm \sqrt{\alpha/\beta}$.

5.2.1. Análisis de momento angular

Mediante este análisis se busca evidenciar el comportamiento de vorticidad asociado al modelo, para esto se lleva a cabo un análisis de conservación de momento angular.

De forma general, el análisis de momento angular permite observar en los sistemas físicos las simetrías rotacionales. En algunos casos esta simetría permanece constante dando lugar a la ley de conservación de momento angular.

Considerando una partícula como la mostrada en la figura 2, la cual se mueve en relación a un punto O , el momento angular de la partícula respecto a este punto corresponde a:

$$\vec{L} = \vec{r} \times m\vec{v} \quad (22)$$

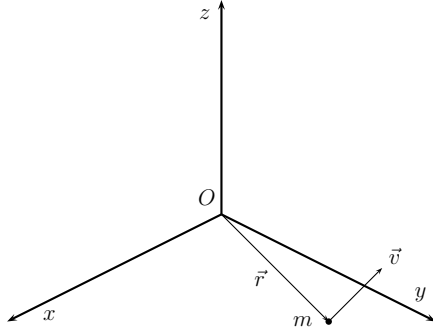


Figura 2. Movimiento circular de una partícula alrededor de O.

En este análisis se busca establecer cuando \vec{L} es constante es decir $d\vec{L}/dt = 0$, entonces, en primer lugar se tiene:

$$\frac{d\vec{L}}{dt} = \frac{d\vec{r}}{dt} \times m\vec{v} + \vec{r} \times m \frac{d\vec{v}}{dt} \quad (23)$$

Puesto que $d\vec{r}/dt \times \vec{v} = 0$, entonces:

$$\frac{d\vec{L}}{dt} = \vec{r} \times \vec{F} \quad (24)$$

Considerando lo anterior, la conservación del momento angular se tiene cuando $\vec{r} \times \vec{F} = 0$, lo cual se presenta en alguna de las siguientes situaciones:

- La magnitud de la fuerza es cero.
- La fuerza que se ejerce sobre la partícula pasa por el radio de giro de esta.

La segunda situación ocurre con partículas que giran respecto a un punto fijo a velocidad constante.

Para el modelo en consideración, las condiciones de conservación del momento angular se pueden establecer realizando el producto vectorial de \vec{r}_i con la segunda ecuación de movimiento del modelo de tal forma que se tiene:

$$m_i \vec{r}_i \times \frac{d\vec{v}_i}{dt} = \vec{r}_i \times (\alpha - \beta v_i^2) \vec{v}_i - \vec{r}_i \times \vec{\nabla} U_{int,i} - \vec{r}_i \times k_f \vec{\nabla} U_{esp,i} \quad (25)$$

Tomando la suma para todas las partículas se tiene:

$$\sum_{i=1}^N m_i \vec{r}_i \times \frac{d\vec{v}_i}{dt} = \sum_{i=1}^N \vec{r}_i \times (\alpha - \beta v_i^2) \vec{v}_i - \sum_{i=1}^N \vec{r}_i \times \vec{\nabla} U_{int,i} - \sum_{i=1}^N \vec{r}_i \times k_f \vec{\nabla} U_{esp,i} \quad (26)$$

Empleando la identidad $\vec{r}_i \times \vec{r}_j = -\vec{r}_j \times \vec{r}_i$ se puede comprobar que los torques internos producidos por las interacciones de dos partículas se anulan:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^N \vec{r}_i \times \vec{\nabla} U_{int,i} &= \sum_{i=1}^N \vec{r}_i \times \frac{a}{N} \sum_{j=1}^N (\vec{r}_i - \vec{r}_j) \\ &= \frac{a}{N} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (\vec{r}_i \times \vec{r}_i - \vec{r}_i \times \vec{r}_j) \\ &= \frac{a}{N} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (-\vec{r}_i \times \vec{r}_j) \\ &= 0 \end{aligned}$$

Como es de apreciar, la fuerza $F_{int,i}$ está dada por la interacción de pares de partículas a lo largo de \vec{r}_{ij} , de tal forma que debido a la simetría de las interacciones internas, este término tiende a ser nulo. Para evidenciar el anterior resultado es posible desarrollar estas sumas de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (\vec{r}_i \times \vec{r}_j) &= [(\vec{r}_1 \times \vec{r}_1) + (\vec{r}_1 \times \vec{r}_2) + (\vec{r}_1 \times \vec{r}_3) + \cdots + (\vec{r}_1 \times \vec{r}_N) \\ &\quad + (\vec{r}_2 \times \vec{r}_1) + (\vec{r}_2 \times \vec{r}_2) + (\vec{r}_2 \times \vec{r}_3) + \cdots + (\vec{r}_2 \times \vec{r}_N) \\ &\quad + (\vec{r}_3 \times \vec{r}_1) + (\vec{r}_3 \times \vec{r}_2) + (\vec{r}_3 \times \vec{r}_3) + \cdots + (\vec{r}_3 \times \vec{r}_N) \\ &\quad \vdots \\ &\quad + (\vec{r}_N \times \vec{r}_1) + (\vec{r}_N \times \vec{r}_2) + (\vec{r}_N \times \vec{r}_3) + \cdots + (\vec{r}_N \times \vec{r}_N)] \\ &= 0 \end{aligned}$$

Considerando que el momento angular asociado a una partícula es:

$$L_i = m_i \vec{r}_i \times \vec{v}_i \quad (27)$$

Para establecer la condición de la conservación del momento angular se tiene:

$$\sum_{i=1}^N \frac{dL_i}{dt} = \sum_{i=1}^N m_i \vec{r}_i \times \frac{d\vec{v}_i}{dt} = 0 \quad (28)$$

Reemplazando la ecuación (26), en (28) se tiene:

$$\sum_{i=1}^N \frac{dL_i}{dt} = \sum_{i=1}^N \vec{r}_i \times (\alpha - \beta v_i^2) \vec{v}_i - \sum_{i=1}^N \vec{r}_i \times k_f \vec{\nabla} U_{esp,i} \quad (29)$$

Considerando el resultado obtenido del análisis de energía donde se tiene un estado constante de energía cuando $v = 0$ o $v = \pm \sqrt{\alpha/\beta}$, al reemplazarlo en la ecuación (29), el componente de auto-propulsión se elimina. De otro lado, considerando un potencial $U_{esp}(\vec{r}_i)$ con simetría cónica que produce fuerzas radiales paralelas a \vec{r}_i se establece que:

$$\sum_{i=1}^N \vec{r}_i \times k_f \vec{\nabla} U_{esp,i} = 0$$

Bajo las anteriores consideraciones se tiene que:

$$\sum_{i=1}^N \frac{dL_i}{dt} = 0 \quad (30)$$

de tal forma que el momento angular se conserva; por lo tanto, en un estado constante de energía y bajo la influencia de una función $U_{esp}(\vec{r}_i)$ con simetría cónica, el enjambre de partículas describe un movimiento circular con la presencia de un vórtice. Adicionalmente, es de notar que al tener $k_f = 0$ se mantiene la conservación del momento angular, por lo que también se presentan movimientos circulares en la ausencia de $U_{esp}(\vec{r}_i)$.

6. Estimación del radio del enjambre

Considerando un movimiento circular uniforme para una partícula i como el mostrado en la figura 3, se tiene una fuerza tangencial F_T y normal F_N tal que:

$$\begin{aligned} F_N &= m_i a_N = m_i \frac{v^2}{R} \\ F_T &= m_i a_T = \dot{w} R \end{aligned}$$

donde a_N y a_T son las aceleraciones normal y tangencial, v la velocidad lineal, w la velocidad angular, \dot{w} la aceleración angular y R el radio.

Para un movimiento circular uniforme se tiene en primer lugar que $\dot{w} = 0$ y considerando los resultados del análisis de energía, la velocidad se puede tomar como $v = \sqrt{\alpha/\beta}$.

Teniendo en cuenta la fuerza de interacción (sin potencial externo) y las partículas efectuando un movimiento circular con radio R , se tiene entonces que la fuerza tangencial corresponde a $F_T = aR$. Bajo estas consideraciones se tiene:

$$\frac{m_i v^2}{R} = aR \quad (31)$$

con $v = \sqrt{\alpha/\beta}$, se establece que:

$$R = \sqrt{\frac{m_i \alpha}{a \beta}} \quad (32)$$

En un caso más general, donde se presenta un potencial externo U_{esp} se tiene que la fuerza producida por este potencial está dada por $\vec{F} = \nabla U_{esp}$, considerando que este potencial presenta una fuerza normal F_N , entonces:

$$\frac{m_i v^2}{R} = aR + F_N \quad (33)$$

$$m_i \frac{\alpha}{\beta} = aR^2 + F_N R \quad (34)$$

$$aR^2 + F_N R - m_i \frac{\alpha}{\beta} = 0 \quad (35)$$

por lo cual se tiene:

$$R = \frac{-F_N \pm \sqrt{F_N^2 + 4am_i\alpha/\beta}}{2a} \quad (36)$$

Para determinar el signo de la raíz se considera el caso cuando $\alpha = 0$ en el cual el radio debe tender a ser cero, por lo tanto se concluye que el signo del radical es positivo.

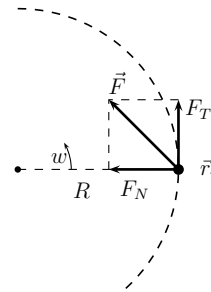


Figura 3. Fuerza normal y tangencial.

En el caso de tener $F_N = 0$ la expresión coincide con el análisis inicial donde:

$$R = \sqrt{\frac{m_i \alpha}{a \beta}}$$

A manera de ejemplo se puede considerar un potencial U_{esp} con simetría cónica de la forma $U_{esp} = (x^2 + y^2)/2$, entonces, $F_N = R$, por lo cual:

$$\frac{m_i v^2}{R} = aR + R$$

es decir:

$$m_i \frac{\alpha}{\beta} = (a + 1)R^2$$

despejando el radio de giro se tiene:

$$R = \sqrt{\frac{m_i \alpha}{(a + 1)\beta}} \quad (37)$$

7. Simulación del modelo

Con el fin de realizar la simulación del modelo las ecuaciones diferenciales (3) y (4) se convierten a tiempo discreto, empleando una aproximación de Euler de primer orden con un intervalo de tiempo Δt , de tal forma que se tiene:

$$\vec{r}_i[n + 1] = \vec{r}_i[n] + \vec{v}_i[n]\Delta t \quad (38)$$

$$\vec{v}_i[n + 1] = \vec{v}_i[n] + \left[(\alpha - \beta v_i^2[n]) \vec{v}_i[n] - \frac{a}{N} \sum_{j=1}^N (\vec{r}_i[n] - \vec{r}_j[n]) - \vec{\nabla} U_{esp}(\vec{r}_i) \right] \frac{\Delta t}{m_i} \quad (39)$$

Como es de apreciar, los parámetros más representativos del modelo son N , a , α y β , por lo que en primer lugar se realiza un grupo de simulaciones donde se consideran diferentes valores de estos parámetros. Así, con este grupo de simulaciones se busca observar las características más dominantes del modelo.

Una de las primeras características a observar se encuentra asociada con la fuerza de auto-propulsión $F_{aut} = (\alpha - \beta v_i^2)v_i$. Desde un punto de vista práctico, esta se puede considerar como una fuerza de tipo disipativa $F_{dis} = -F_{aut}$. En la figura 4 se puede observar su efecto para diferentes valores de α ; al incrementar su valor la fuerza de propulsión aumenta. En esta figura los valores negativos corresponden a la propulsión suministrada, mientras que los valores positivos se encuentran asociados con la acción de frenado.

Adicionalmente en la figura 5 se puede observar el comportamiento de F_{dis} para diferentes valores de β . Como es de apreciar, al incrementar el valor de β la fuerza de propulsión disminuye mientras se incrementa el efecto de la fuerza de frenado. También se puede notar que existen valores de v donde esta fuerza es negativa produciendo en este caso una propulsión de la partícula.

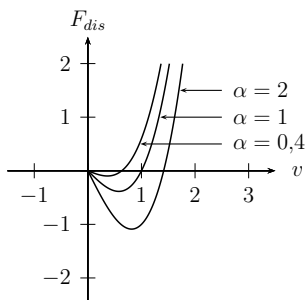


Figura 4. Fuerza no lineal en función de v , para $\beta = 1$ y α de 2, 1 y 0,4.

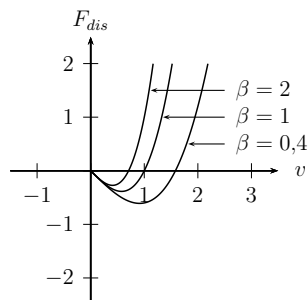


Figura 5. Fuerza no lineal en función de v , para $\alpha = 1$ y β de 2, 1 y 0,4.

8. Simulación del modelo sin potencial externo

En este grupo de simulaciones se considera que no existe el potencial externo asociado al ambiente. Principalmente se observa el efecto que tienen los parámetros N , a , α y β en la distribución final del enjambre. La simulación se realiza empleando un paso fijo de $\Delta t = 0,1$.

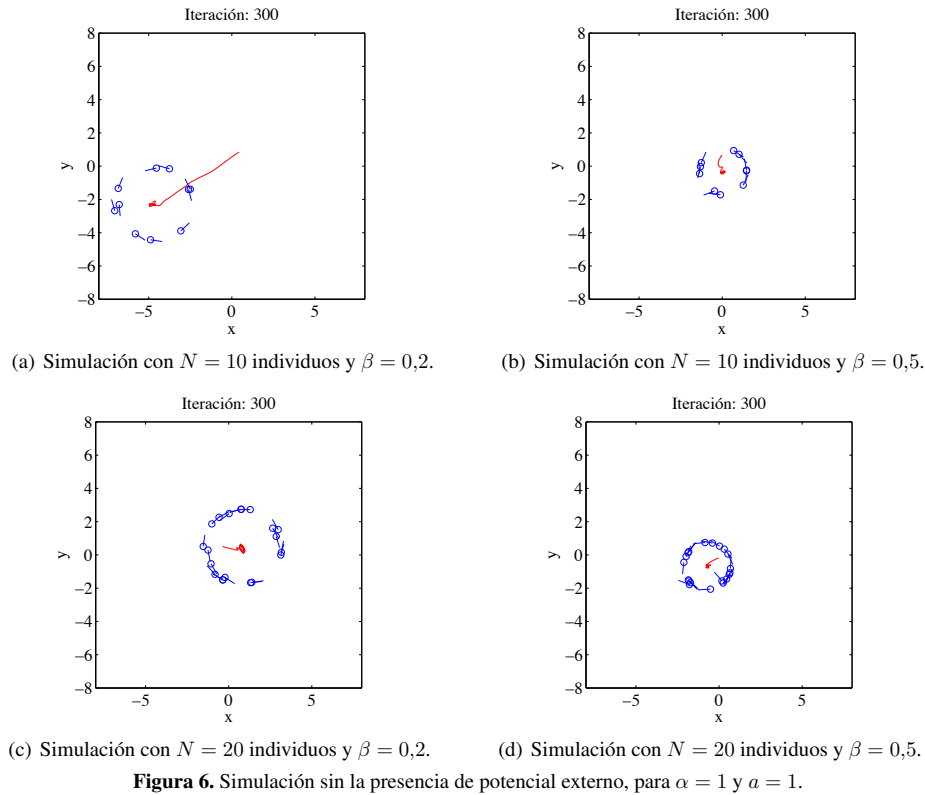
8.1. Simulación con movimiento de rotación

Considerando condiciones iniciales aleatorias tanto para la posición como para la velocidad, se tienen los resultados presentados en la figura 6, donde se observa que el enjambre describe una trayectoria circular, apreciándose diferentes radios de giro según los parámetros considerados; adicionalmente, es de notar que el sentido de giro no es el mismo para todas las partículas.

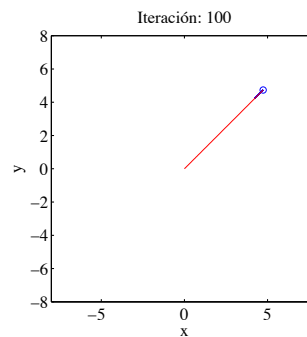
En la figura 6 se puede observar que el centro de rotación de las partículas depende de las condiciones iniciales, debido a la falta de un potencial externo que influya en el desplazamiento de estas. También es de apreciar en las simulaciones de la figura 6, que el sentido de giro de las partículas no presenta la misma dirección para todas, ya que no se considera ninguna fuerza de alineamiento en el modelo seleccionado. Finalmente, es de resaltar que al tener un valor mayor de β el radio de giro tiende a disminuir, lo cual se considera con mayor detalle en simulaciones posteriores.

8.2. Simulación con movimiento de traslación

Esta simulación corresponde a un caso particular donde el enjambre realiza un movimiento de traslación. Este tipo de movimiento se presenta cuando la posición y velocidad inicial de las partículas es la misma. La posición inicial corresponde al punto $[0, 0]$ origen del sistema de referencia y la velocidad se toma como $[v_{xi,0}, v_{yi,0}] = [0,001, 0,001]$. De esta forma, en la figura 7 es posible apreciar el movimiento de traslación que describen las partículas cuando las condiciones iniciales son iguales para la posición y la velocidad.



Como se ve en la figura 7 la posición de las partículas coincide describiendo un movimiento lineal en dirección de la velocidad inicial. En este caso, el enjambre se comporta como una sola partícula presentándose un colapso del enjambre, producido por las condiciones iniciales de las partículas.



9. Simulación del modelo con potencial externo

En este conjunto de simulaciones se observa el efecto que tiene el potencial asociado al espacio o ambiente donde se desplazan las partículas. Este potencial puede ser empleado para guiar el

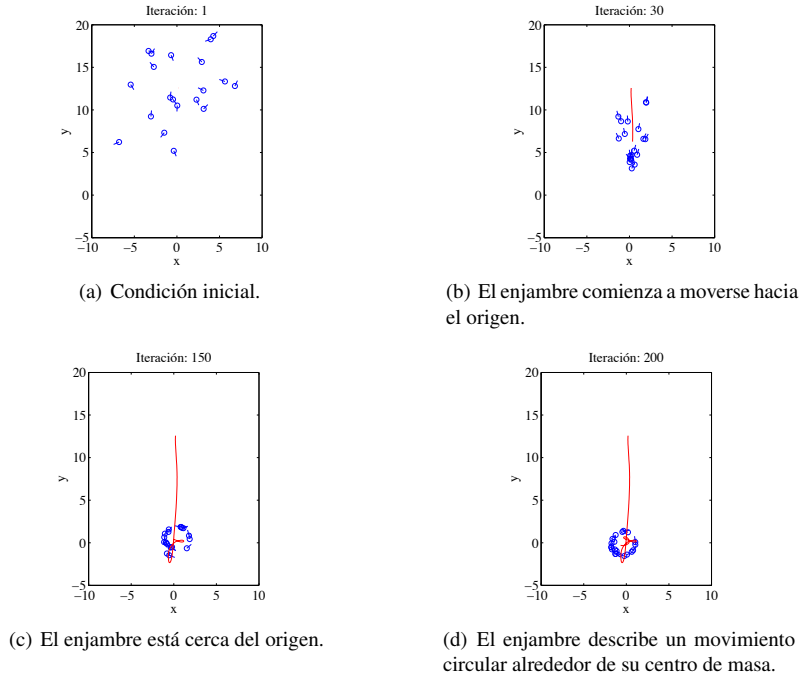


Figura 8. Comportamiento del enjambre en la presencia de un potencial externo.

enjambre. Para garantizar la convergencia del enjambre a un mismo punto, el potencial debe ser monomodal, es decir que solo presenta un punto mínimo.

El potencial considerado en dos dimensiones presenta simetría cónica de la forma $U_{esp} = k_x x^2 + k_y y^2$, para el caso donde $k_x = k_y$ se tiene un potencial “parabólico” (paraboloide de revolución), por otro lado con $k_x \neq k_y$ se presenta un potencial “elíptico” (paraboloide elíptico).

9.1. Combinación de movimientos de traslación y rotación

En esta simulación se puede apreciar que el enjambre presenta dos comportamientos, un movimiento de traslación y otro de rotación alrededor de un punto (vórtice). Para ilustrar este hecho, se tiene un espacio de dos dimensiones tal que $\vec{r} = [x, y]^T$ y un enjambre sometido a un potencial parabólico de la forma $U_{esp}(\vec{r}) = 0,5|\vec{r}|^2$, el cual se encuentra centrado en el origen. Las partículas tienen condiciones iniciales $[x_{i,0}, y_{i,0}] \neq 0$ para la posición y $[v_{xi,0}, v_{yi,0}] = [0, 0]$ para la velocidad, donde las posiciones iniciales son elegidas al azar. Los parámetros del modelo en esta simulación son $N = 20$, $\alpha = 4$, $\beta = 1$ y $a = 1$.

En la figura 8, es posible observar cómo las partículas se desplazan primero al origen (punto mínimo de U_{esp}) y una vez que el enjambre está lo suficientemente cerca de este punto, realiza mo-

vimientos circulares (comportamiento asociado a un ciclo límite) donde la magnitud para la velocidad de cada partícula tiende a ser $|\vec{v}_i| = \sqrt{\alpha/\beta}$, lo cual se puede apreciar en la figura 9.

Con estas simulaciones se puede apreciar los intercambios del sistema acoplado (enjambre) entre movimientos de traslación y rotación. Para el caso considerado el comportamiento está dado por una función parabólica (convexa), por lo cual, para otro tipo de potenciales el enjambre puede exhibir un comportamiento más complejo.

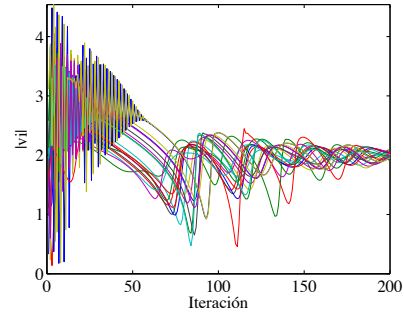


Figura 9. Evolución de la velocidad para cada partícula del enjambre. Las magnitudes de las velocidades convergen a un valor constante de $2 = \sqrt{\alpha/\beta}$.

9.2. Velocidad y distribución del enjambre

Con el propósito de observar la distribución de las partículas, así como la velocidad de estas cuando se tiene un potencial externo, se realiza un conjunto de simulaciones considerando un potencial parabólico $U_{esp} = 0,5(x^2 + y^2)$ tomando $m_i = 1$, $a = 1$, $N = 20$, $\beta = 1$ y α para 2 y 4, los resultados obtenidos para estos casos se muestran en las figuras 10 y 11. En la figura 10 se presentan los resultados para 200 iteraciones con $\alpha = 2$ y condiciones iniciales aleatorias para la posición.

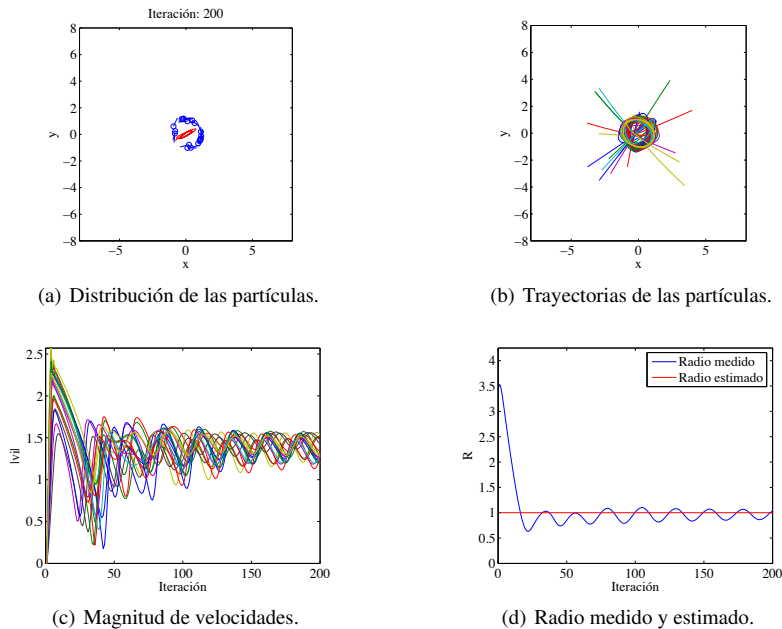


Figura 10. Resultados de la simulación con $\alpha = 2$.

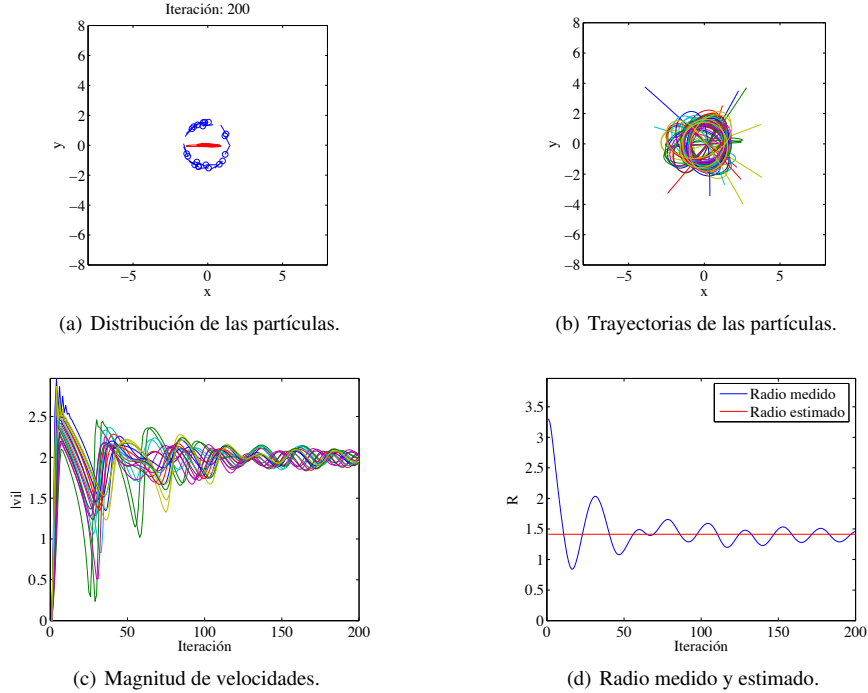


Figura 11. Resultados de la simulación con $\alpha = 4$.

La figura (a) muestra la localización y orientación final de las partículas observándose la formación de un vórtice. Por su parte en (b) se tiene el recorrido de las partículas, (c) muestra la magnitud de las velocidades y en (d) se puede apreciar el valor del radio medido y del estimado para el enjambre de partículas.

Considerando la ecuación (37) se puede establecer el radio de giro de tal forma que para $\alpha = 2$ se tiene un radio estimado de 1,0 y para $\alpha = 4$ se tiene un radio estimado de 1,4142.

En la figura 11 se pueden observar los resultados de la simulación en el caso de tener $\alpha = 4$. En estas figuras se aprecia que el enjambre logra tener una distribución circular donde su radio de giro se encuentra cerca del valor estimado. Adicionalmente se puede apreciar de nuevo que la magnitud de la velocidad de las partículas tiende a ser $|\vec{v}_i| = \sqrt{\alpha/\beta}$.

9.3. Simulación para un potencial no simétrico

En este caso se considera un potencial de la forma $U_{esp} = (k_x x^2 + k_y y^2)$ y los parámetros del modelo con $m_i = 1$, $a = 2$, $N = 20$, $\beta = 1$ y $\alpha = 4$. Las condiciones iniciales de las partículas se consideran aleatorias para las posiciones y cero para las velocidades.

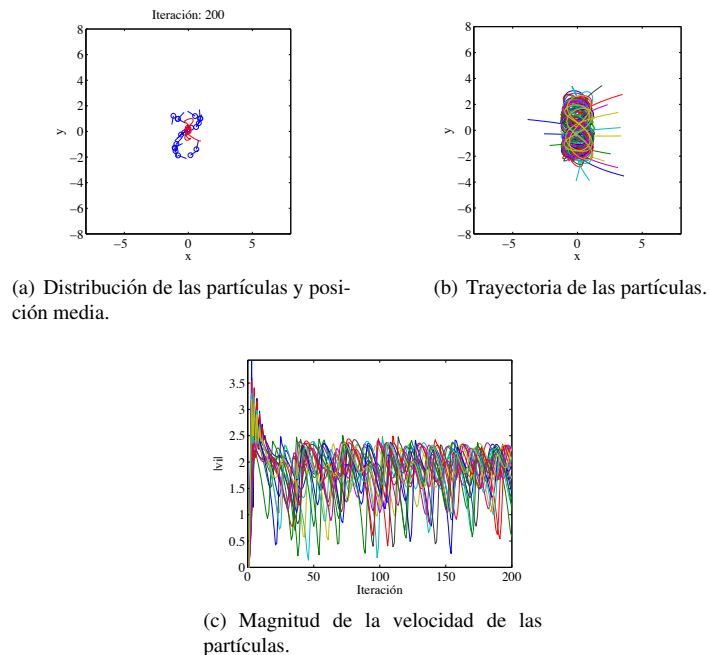


Figura 12. Distribución de las partículas y magnitud de velocidades, para $k_x = 4$ y $k_y = 0,5$.

En la figura 12 se pueden apreciar los resultados de la simulación cuando se toma $k_x = 4$ y $k_y = 0,5$. En (a) se muestra la posición media de las partículas y la distribución de estas en la última iteración. Por su parte, en la figura (b) se tiene la posición de todas las partículas y en la figura (c), se muestra la magnitud de la velocidad de las partículas.

En estas simulaciones se aprecia que no se presentan movimientos circulares perfectos. Sin embargo, al seguir teniendo un potencial monomodal, las partículas describen movimientos oscilatorios alrededor del punto donde el potencial tiene su menor valor.

10. Simulación del modelo para cuatro dimensiones

Con el propósito de apreciar el comportamiento del enjambre en varias dimensiones se realiza una simulación para cuatro dimensiones teniendo el resultado mostrado en las figuras 13, 14 y 15. Para la visualización de estos resultados, se toman las diferentes parejas de ejes coordenados que se pueden tener y se presentan en los respectivos planos el desplazamiento y orientación de las partículas.

En la figura 13 se muestra la posición media de las partículas, así como la distribución y orientación de estas en la última iteración para los diferentes pares de ejes coordenados. En la figura 14 se tiene la posición de todas las partículas y en la figura 15 se muestra la magnitud de la velocidad de las partículas.

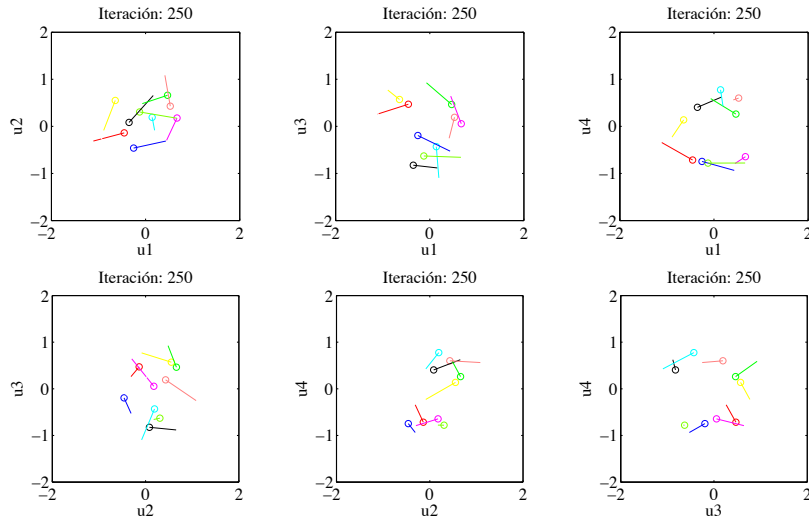


Figura 13. Distribución de las partículas en la última iteración (representación en parejas de coordenadas).

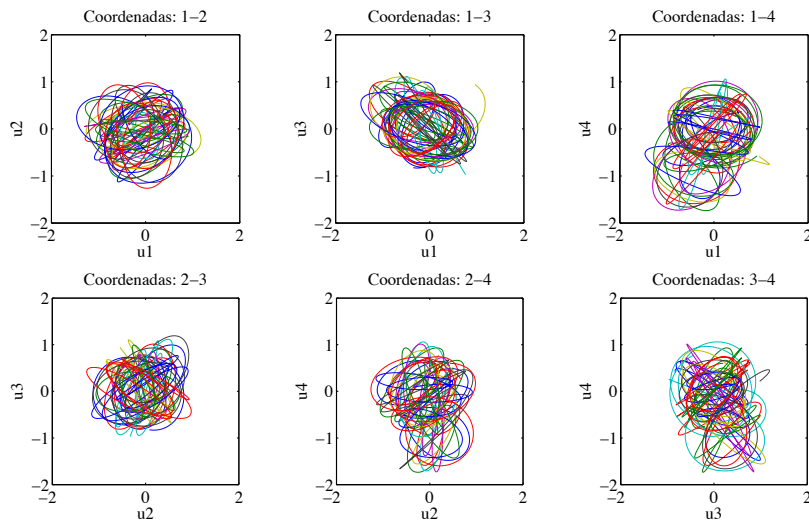


Figura 14. Trayectorias de las partículas (representación en parejas de coordenadas).

Con las simulaciones de las figuras 13 y 14 se observa que el modelo permite describir comportamientos cíclicos (cercaos a movimientos circulares) en las cuatro dimensiones. Es de apreciar un comportamiento similar para los diferentes pares de ejes coordenados que se tomaron para la presentación de los resultados. Adicionalmente, en la figura 15 se comprueba que la magnitud de la velocidad de las partículas tiende a ser $\sqrt{\alpha/\beta}$.

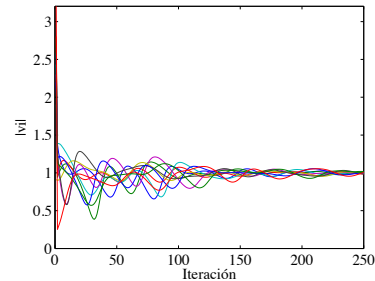


Figura 15. Magnitud de la velocidad de las partículas.

11. Conclusiones y expectativas futuras

Con el análisis realizado se mostró que el enjambre de partículas puede describir comportamientos circulares con la presencia de un vórtice. Adicionalmente mediante las simulaciones se corroboró de forma cualitativa los resultados obtenidos del análisis. Se espera que estos análisis se puedan emplear en trabajos futuros para mejorar la selección de parámetros, así como el comportamiento del enjambre.

Para una situación donde las velocidades y posiciones iniciales de las partículas son iguales, se presenta un movimiento lineal de las partículas. Cuando las posiciones y velocidades iniciales de las partículas se consideran aleatorias el enjambre logra describir un movimiento con características de vorticidad.

Mediante simulación se puede observar que la estimación del radio del giro del enjambre se acerca al valor real medido del enjambre. Este resultado permite establecer un mecanismo para controlar de forma aproximada el comportamiento del enjambre al modificar sus parámetros.

Aunque la presentación de los resultados de la simulación en más de tres dimensiones puede limitar la observación completa del comportamiento del enjambre, con la metodología empleada se puede apreciar de forma aproximada el movimiento que tienen las partículas.

Este tipo de comportamiento se puede emplear para el desarrollo de algoritmos de optimización de tal forma que se pueda mejorar la capacidad de exploración y explotación al incluir movimientos circulares y lineales del enjambre. La exploración se relaciona con la dispersión que puede lograr el enjambre de partículas y la explotación con la convergencia del enjambre a un determinado punto.

Referencias

- [1] A. Czirók, T. Vicsek, "Collective behavior of interacting self-propelled particles". *Physica A*, vol. 281, num. 1-4, 2000, pp. 17-29.
- [2] T. Vicsek, "Universal patterns of collective motion from minimal models of flocking". *Second IEEE International Conference on Self-Adaptive and Self-Organizing Systems*, 2008, pp. 3-11.

- [3] A. Mikhailov, V. Calenbuhr, "From cells to societies: Models of complex coherent action". *Springer Series in Synergetics*, 2002, pp. 33-68.
- [4] W. Ebeling, "Active brownian motion of pairs and swarms of particles". *Acta Physica Polonica B*, vol. 38, 2007, pp. 1657-1671.
- [5] U. Erdmann, W. Ebeling, V. Anishchenko, "Excitation of rotational modes in two-dimensional systems of driven Brownian particles Physical". *Physical Review E*, vol. 65, 2002, pp. 061106 1-9.
- [6] H. Espitia, J. Sofrony, "Path planning of mobile robots using potential fields and swarms of brownian particles". *IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC)*, June 5-8, 2011.
- [7] H. Espitia, J. Sofrony, "Vortex Particle Swarm Optimization". *IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC)*, June, 2013.
- [8] H. Espitia, J. Sofrony, "Algoritmo de optimización basado en enjambres de partículas con comportamiento de vorticidad y búsqueda individual y grupal". *Tecnura*, vol. 18, no. 42, 2014, pp. 24-37.
- [9] H. Espitia, J. Sofrony, "Vortex Particle Swarm Optimization in 2D Cases". *International Conference on Mechatronics, Electronics and Automotive Engineering (ICMEAE)*, November, 2015.
- [10] H. Espitia, J. Sofrony, "Proposal for Parameter Selection of the Vortex Particle Swarm Optimization During the Dispersion Stage". *International Conference on Mechatronics, Electronics and Automotive Engineering (ICMEAE)*, November, 2013.
- [11] H. Espitia, J. Sofrony, "Dispersion as Stopping Criterion for Vortex Particle Swarm Optimization". *2nd International Symposium on Instrumentation and Measurement, Sensor Network and Automation (IMSNA)*, December 23-24, 2013.
- [12] D. Sumpter, "The principles of collective animal behaviour". *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, vol. 361, num. 1465, 2006, pp. 5-22.
- [13] T. Vicsek, A. Czirók, E. Ben-Jacob, I. Cohen, O. Shochet, "Novel type of phase transition in a system of self-driven particles". *Physical Review Letters*, vol. 75, 1995, pp. 1226-1229.
- [14] I. Couzin, J. Krause, N. Franks, S. Levin, "Effective leadership and decision making in animal groups on the move". *Letters to nature*, vol. 433, 2005, pp. 513-516.
- [15] I. Bajec, F. Heppner, "Organized flight in birds". *Animal Behaviour*, vol. 78, num. 4, 2009, pp. 777-789.
- [16] H. Zhang, M. Chen, G. Stan, T. Zhou, J. Maciejowski, "Collective behavior coordination with predictive mechanisms". *IEEE Circuits and Systems Magazine*, vol. 8, num. 3, 2008, pp. 67-85.
- [17] C. Rodríguez, M. Melgarejo, "Arquitectura FPGA para simulación de aprovisionamiento de alimentos en colonias de hormigas artificiales". *Ingeniería*, vol. 20, num. 2, 2015, pp. 245-260.
- [18] H. Berg, *Random walks in biology*, Princeton University Press, 1983.
- [19] Y. Çengel, J. Cimbala, *Mecánica de fluidos, Fundamentos y Aplicaciones*, McGraw-Hill, 2006.
- [20] H. Levine, W. Rappel, I. Cohen, "Self-organization in systems of self-propelled particles". *Physical Review E*, vol. 63, num. 1, 2001.
- [21] M. D'Orsogna, Y. Chuang, A. Bertozzi, L. Chayes, "Self-propelled particles with soft-core interactions: patterns, stability, and collapse". *Physical Review Letters*, vol. 96, 2006, pp. 104302 1-4.
- [22] W. Ebeling, U. Erdmann, "Nonequilibrium Statistical Mechanics of Swarms of Driven Particles". *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, vol. 314, num. 1-4, 2002, pp. 92-96.
- [23] U. Erdmann, W. Ebeling, A. Mikhailov, "Noise Induced Transition from Translational to Rotational Motion of Swarms". *Physical Review E*, vol. 71, num. 5, 2005, pp. 051904 1-7.
- [24] A. Ordemann, "Vortex-swarming of the zooplankton Daphnia". *The Biological Physicist*, vol. 2, num. 3, 2002, pp. 5-10.
- [25] C. Reynolds, "Flocks, herds, and schools: A distributed behavioral model, in computer graphics". *SIG-GRAPH'87 Conference Proceedings*, 1987.
- [26] F. Schweitzer, "Active Brownian particles with internal energy depot". *Traffic and Granular Flow'99*, 2000, pp. 161-172.
- [27] F. Schweitzer, W. Ebeling, B. Tilch, "Statistical mechanics of canonical dissipative systems and applications to swarm dynamics". *Physical Review E*, vol. 64, num. 2, 2001, pp. 021110 1-12.
- [28] R. Mach, F. Schweitzer, "Multi-agent model of biological swarming". *Lecture Notes in Artificial Intelligence (LNAI)*, vol. 2801, 2003, pp. 810-820.
- [29] K. Alligood, T. Sauer, J. Yorke, *An introduction to dynamical systems*, Springer, 1st edition, 1997.
- [30] C. McInnes, "Vortex formation in swarms of interacting particles". *Physical Review E*, vol. 75, num. 3, 2007, pp. 032904 1-3.

Helbert Eduardo Espitia Cuchango

Ingeniero Electrónico, Ingeniero Mecatrónico, Especialista en Telecomunicaciones Móviles, Magister en Ingeniería Industrial, Magister en Ingeniería Mecánica, Doctor en Ingeniería de Sistemas y Computación. Docente de planta, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, e-mail: heespitiac@udistrital.edu.co

Jorge Iván Sofrony Esmeral

Ingeniero Eléctrico, Universidad de los Andes, MSc Sistemas de Control, Imperial College of Science, PhD Sistemas de Control, University of Leicester. Docente de Planta Universidad Nacional de Colombia, e-mail: jsufronye@unal.edu.co



Métrica de Hausdorff en el Ambiente Difuso

Hausdorff Metric in the Fuzzy Environment

Carlos Orlando Ochoa Castillo¹ Laura Victoria Forero Vega²

¹Universidad Distrital Francisco José de Caldas, correo electrónico: oochoac@udistrital.edu.co,

²Universidad Distrital Francisco José de Caldas, correo electrónico: lau_forero85@hotmail.com

Recibido: 28-04-2015. Modificado: 01-09-2015. Aceptado: 26-07-2016

Resumen

Contexto: De manera intuitiva, se ha establecido el concepto de conjunto como una colección distinta de elementos, esto es, un conjunto se determina vía la relación de pertenencia de un elemento de un universo al conjunto. La situación, por supuesto, es si pertenece o no pertenece; en un subconjunto difuso a cada elemento del universo se le asocia con un grado de pertenencia, que es un número entre 0 y 1. Los subconjuntos difusos se establecen como una correspondencia entre cada elemento del universo y un grado de pertenencia.

Método: El estudio fue basado en trabajos anteriores como artículos o libros, en donde autores exponen ideas sobre la importancia de los subconjuntos difusos y la necesidad de crear con ellos nuevas teorías y espacios.

Resultados: Al combinar dos teorías, se genera un nuevo ambiente de estudio que permite afirmar que la distancia de Hausdorff corresponde, extiende y ajusta la noción de distancia entre subconjuntos no vacíos compactos en el ambiente de los espacios métricos, mas exactamente en (\mathbb{R}^n, d_u) .

Conclusiones: La construcción realizada permite obtener un espacio métrico con varias cualidades, en donde se puede afirmar que son consecuencia del objeto de estudio inicial.

Palabras clave: Conjuntos compactos, conjuntos difusos, métrica de Hausdorff.

Idioma: Español

Abstract

Context: Intuitively, the concept the set has been established as a collection of different elements, that is, a set is determined via the relationship of membership of an element of a universe as a whole. The situation, of course, is whether or does not belong; in a diffuse to each element subset of the universe it is associated with a degree of membership, which is a number between 0 and 1. The fuzzy subsets are established as a correspondence between each element of the universe and a degree of membership.

Method: The study was based on previous work as articles or books, where authors present ideas about the importance of fuzzy subsets and the need to create with them new theories and spaces.

Results: By combining two theories, a new study environment that allows state that corresponds Hausdorff distance, extends and adjusts the notion of distance between nonempty compact subsets in the environment of metrics spaces, more accurately generated in (\mathbb{R}^n, d_u) .

Conclusions: The construction carried out allows a metric space with several qualities, where we can say that are the object consequence initial study.

Keywords: Compact sets, fuzzy sets, Hausdorff metric.

Open access



Citación: C.O. Ochoa, L.V. Forero, "Métrica de Hausdorff en el Ambiente Difuso," INGENIERÍA, vol. 21, no. 3, pp. 346-359, 2016.

© Los autores; titular de derechos de reproducción Universidad Distrital Francisco José de Caldas. En línea DOI: <http://dx.doi.org/10.14483/udistrital.jour.reveng.2016.3.a06>





1. Introducción

En 1965 Zadeh introdujo la noción de conjunto difuso (ver [12]) debido a que la mayoría de las veces, las clases de cosas encontradas en el mundo físico real no tienen precisamente un criterio de pertenencia. Esta observación pone en conexión la existencia de las representaciones mentales de la realidad y representaciones matemáticas habituales de los mismos y fue el punto de partida hacia el desarrollo de los conjuntos difusos.

En 1980 Dubois y Prade definieron la distancia entre dos conjuntos difusos (ver [4]); luego Puri y Ralescu en 1983 expusieron una introducción de utilizar la distancia de Hausdorff entre conjuntos difusos; aunque la mayor referencia fue expuesta por Diamond y Kloeden [3] en 1994. Lo anterior condujo a que más adelante y mientras se investigaba problemas de sistemas dinámicos sin solución, Laksmikanthan y R.N Mohapatra [8] en 2003 publicaron lo hecho por Diamond y Kloeden para \mathbb{R}^n como medio de resolver dichos problemas.

Este artículo tiene como finalidad el estudio de la métrica de Hausdorff, construida inicialmente en el ambiente \mathbb{R}^n y luego extendida a una clase particular de subconjuntos difusos de \mathbb{R}^n , obteniendo un nuevo espacio métrico. Se parte de una definición de distancia entre un punto y un conjunto, con ello se edifica paso a paso la métrica de Hausdorff, igualmente se exhibe para el ambiente difuso.

En la primera sección, Métrica de Hausdorff, se muestra la construcción del espacio métrico (K_n, d_H) , de los subconjuntos compactos de \mathbb{R}^n con la métrica de Hausdorff y se exponen algunas de sus propiedades; en la sección El espacio E^n , se describe un espacio particular de conjuntos difusos de \mathbb{R}^n y algunas características; en la tercera sección, El espacio métrico (E^n, d) , se muestra el espacio resultante al relacionar la teoría de las dos secciones anteriores; en la última sección, Comparación con otros espacios métricos, se exponen otras distancias definidas en subconjuntos difusos y se realiza una comparación con el trabajo realizado anteriormente.

2. Métrica de Hausdorff

Apartir del espacio métrico (\mathbb{R}^n, d_u) , es decir, para $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ y $z = (z_1, z_2, \dots, z_n)$ elementos de \mathbb{R}^n , $d_u(x, z) = \|x - z\| = \sqrt{\sum_{k=1}^n (x_k - z_k)^2}$, [7], [1]; se inicia la construcción de la métrica de Hausdorff.

Definición 2.1. Sea x un punto de \mathbb{R}^n y A un subconjunto no vacío de \mathbb{R}^n , la distancia $d(x, A)$ del punto x a A es

$$d(x, A) = \inf \{d_u(x, a) : a \in A\}.$$

En los espacios métricos, se tienen diferentes tipos de colecciones de sus elementos de acuerdo a unas condiciones, estos son, entre otros, los conceptos de vecindad, bola abierta, bola cerrada y adherencia, que son como en [1].

Proposición 2.1. Sea x un punto en \mathbb{R}^n y A un subconjunto no vacío de \mathbb{R}^n entonces:

1. $d(x, A) \geq 0$,



2. $d(x, A) = 0$ si y solo si $x \in \bar{A}$

Prueba.

1. Por ser (\mathbb{R}^n, d_u) un espacio métrico, $d_u(x, a) \geq 0$ para todo $a \in A$, luego por propiedades del ínfimo, $\inf \{\|x - a\| : a \in A\} \geq 0$, así $d(x, A) \geq 0$.
2. Sea $d(x, A) = 0$ y se supone que $x \notin \bar{A}$, esto es, existe $\epsilon > 0$ tal que $\mathbb{B}_\epsilon(x) \cap A = \emptyset$ lo que indica que $d(x, A) > \epsilon$, lo cuál es una contradicción.
Recíprocamente, sea $x \in \bar{A}$, esto es, para todo $\epsilon > 0$ se tiene $\mathbb{B}_\epsilon(x) \cap A \neq \emptyset$, en particular, para todo $n \in \mathbb{N}$ se tiene $\mathbb{B}_{\frac{1}{n}}(x) \cap A \neq \emptyset$. Lo que indica que, $d(x, A) < \frac{1}{n}$ y

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} = 0,$$

entonces $d(x, A) = 0$.

Definición 2.2. Sean A y B dos subconjuntos acotados y no vacíos de \mathbb{R}^n , la separación de Hausdorff de B a A es

$$d_H^*(B, A) = \sup \{d(b, A) : b \in B\}.$$

Este concepto tiene una definición equivalente, $d_H^*(B, A) = \inf \{\epsilon > 0 : B \subseteq A + \epsilon \bar{\mathbb{B}}_1(0)\}$, aparece en [2] su demostración, donde $\bar{\mathbb{B}}_1(0)$ es la bola cerrada de centro en 0 y radio 1 de \mathbb{R}^n .

Proposición 2.2. Sean $A, B, C \subseteq \mathbb{R}^n$ no vacíos y acotados, entonces

1. $d_H^*(B, A) \geq 0$
2. $d_H^*(B, A) = 0$ si y solo si $B \subseteq \bar{A}$
3. $d_H^*(B, A) \leq d_H^*(B, C) + d_H^*(C, A)$

Prueba.

1. Como $d(b, A) \geq 0$ para todo $b \in B$, por propiedades del supremo (ver [1]),

$$\sup \{d(b, A) : b \in B\} \geq 0,$$

en consecuencia $d_H^*(B, A) \geq 0$.

2. Se supone que $d_H^*(B, A) = 0$, esto es, $\sup \{d(b, A) : b \in B\} = 0$, $d(b, A) = 0$ para todo $b \in B$; por la proposición 2.1 $b \in \bar{A}$ y como es para todo elemento de B , se obtiene que $B \subseteq \bar{A}$.

Recíprocamente, si $B \subseteq \bar{A}$, por la proposición 2.1,

$$d(b, A) = 0 \text{ para todo } b \in B,$$

en general, $\sup \{d(b, A) : b \in B\} = 0$, luego $d_H^*(B, A) = 0$.



3. Sean $d_H^*(B, C) = \alpha$ y $d_H^*(C, A) = \beta$, entonces $\alpha + \beta = d_H^*(B, C) + d_H^*(C, A)$, esto es,

$$B \subseteq C + \alpha \overline{\mathbb{B}}_1(0) \text{ y } C \subseteq A + \beta \overline{\mathbb{B}}_1(0)$$

así,

$$\begin{aligned} B &\subseteq (A + \beta \overline{\mathbb{B}}_1(0)) + \alpha \overline{\mathbb{B}}_1(0) \\ &\subseteq A + (\beta + \alpha) \overline{\mathbb{B}}_1(0) \end{aligned}$$

con lo cual,

$$\inf \{ \epsilon > 0 : B \subseteq A + \epsilon \overline{\mathbb{B}}_1(0) \} \leq \alpha + \beta.$$

En consecuencia, $d_H^*(B, A) \leq d_H^*(B, C) + d_H^*(C, A)$.

La separación de Hausdorff se constituye en un instrumento eficaz en la consecución de una métrica, claro está con algunas propiedades adicionales en el contexto.

Definición 2.3. Sean A y B dos subconjuntos no vacíos y acotados de \mathbb{R}^n , la distancia Hausdorff entre A y B es

$$d_H(A, B) = \max \{ d_H^*(A, B), d_H^*(B, A) \}.$$

Con esta definición, la distancia Hausdorff satisface la simetría, pero aún falta agregar condiciones adicionales al ambiente para obtener la estructura de espacio métrico; así, se restringe, aun más, la naturaleza de los subconjuntos de \mathbb{R}^n en consideración. El resultado que sigue, se aplica a un universo específico con alguna incidencia en los demás.

Proposición 2.3. (K^n, d_H) , la colección de subconjuntos compactos de \mathbb{R}^n con la distancia de Hausdorff, es un espacio métrico.

Prueba. Sean $A, B, C \subseteq \mathbb{K}^n$ no vacíos.

1. Se afirma que $d_H^*(A, B) \geq 0$ y $d_H^*(B, A) \geq 0$, entonces $\max \{ d_H^*(A, B), d_H^*(B, A) \} \geq 0$, luego $d_H(A, B) \geq 0$

2. Sea $d_H(A, B) = 0$, por propiedades del máximo $d_H^*(A, B) = 0$ y $d_H^*(B, A) = 0$, se tiene, $A \subseteq \overline{B}$ y $B \subseteq \overline{A}$, dado que A y B son cerrados de \mathbb{R}^n entonces $A = \overline{A}$ y $B = \overline{B}$, es decir, $A = B$.

Recíprocamente, sea $A = B$, dado que A, B son subconjuntos cerrados de \mathbb{R}^n , $A = \overline{A}$ y $B = \overline{B}$, de modo que $\overline{A} = \overline{B}$, esto es, $A \subseteq \overline{B}$ y $B \subseteq \overline{A}$, se tiene, $d_H^*(A, B) = 0$ y $d_H^*(B, A) = 0$, luego $d_H(A, B) = 0$.

3. Se tiene que

$$\begin{aligned} d_H(A, B) &= \max \{ d_H^*(A, B), d_H^*(B, A) \} \\ &= \max \{ d_H^*(B, A), d_H^*(A, B) \} \\ &= d_H(B, A). \end{aligned}$$



4. Como $d_H^*(B, A) \leq d_H^*(B, C) + d_H^*(C, A)$ y $d_H^*(A, B) \leq d_H^*(A, C) + d_H^*(C, B)$, entonces

$$\begin{aligned} d_H(A, B) &= \max\{d_H^*(A, B), d_H^*(B, A)\} \\ &\leq \max\{d_H^*(A, C) + d_H^*(C, B), d_H^*(B, C) + d_H^*(C, A)\} \\ &\leq \max\{d_H^*(A, C), d_H^*(C, A)\} + \max\{d_H^*(C, B), d_H^*(B, C)\} \\ &= d_H(A, C) + d_H(C, B) \end{aligned}$$

De modo que la distancia de Hausdorff mide cuan lejos están uno de otro dos subconjuntos compactos de \mathbb{R}^n . Además, (K^n, d_H) cuenta con las propiedades de la completitud y K_C^n , la colección de subconjuntos compactos y convexos de \mathbb{R}^n , es un subconjunto cerrado en él; para ver esto, es necesario el resultado que sigue,

Proposición 2.4. Sean A, B subconjuntos no vacíos de K^n , si $d_H(A, B) \leq \epsilon$ y $b \in B$, existe $a \in A$ tal que $\|a - b\| \leq \epsilon$

Prueba. Sean $d_H(A, B) \leq \epsilon$ y $b \in B$, supongamos que para todo $a \in A$ se tiene $\|b - a\| > \epsilon$, en consecuencia $\inf\{\|a - b\| : a \in A\} > \epsilon$, es decir, $d(b, A) > \epsilon$. Por otro lado, $d_H(A, B) \leq \epsilon$, con lo cual $d_H^*(B, A) \leq \epsilon$, por tanto, $B \subseteq A + \epsilon\mathbb{B}_1(0)$. Así, para todo $b \in B$, se tiene que $d(b, A) \leq \epsilon$, lo que contradice el supuesto.

La prueba del siguiente teorema aparece en [2].

Teorema 2.1. (K^n, d_H) es un espacio métrico completo¹, además si $\{A_n\}_{n \in \mathbb{N}}$ es una sucesión de Cauchy en K^n , su límite es

$$A = \{a \in \mathbb{R}^n : \text{existe } \{a_{n_i}\}_{i \in \mathbb{N}}, a_{n_i} \in A_{n_i} \text{ y } \lim_{i \rightarrow \infty} a_{n_i} = a\}.$$

Teorema 2.2. K_C^n , la colección de todos los conjuntos convexos compactos de \mathbb{R}^n , es un subconjunto cerrado del espacio métrico (K^n, d_H) .

Prueba. Sea $A \in K^n - K_C^n$, así A es compacto no convexo, luego existen $x, y \in A$ y $\lambda \in [0, 1]$ tales que $z = \lambda x + (1 - \lambda)y \notin A$. Como A es compacto, es cerrado, con lo cual existe $\epsilon > 0$ tal que $\mathbb{B}_{2\epsilon}(z) \cap A = \emptyset$.

Sea $A' \in K^n$ con $d_H(A, A') < \epsilon$, entonces, $A \subseteq A' + \epsilon\overline{\mathbb{B}}_1(0)$ y como $x, y \in A$, existen $x', y' \in A'$ con $\|x - x'\| \leq \epsilon$ y $\|y - y'\| \leq \epsilon$. Luego:

$$\begin{aligned} \|\lambda x' + (1 - \lambda)y' - z\| &= \|\lambda x' + (1 - \lambda)y' - \lambda x + (1 - \lambda)y\| \\ &\leq \lambda \|x - x'\| + (1 - \lambda) \|y - y'\| \\ &\leq \lambda \epsilon + (1 - \lambda)\epsilon \\ &= \epsilon \end{aligned}$$

Ahora sea $z' = \lambda x' + (1 - \lambda)y'$ y se supone que $z' \in A'$, como $A' \subseteq A + \epsilon\overline{\mathbb{B}}_1(0)$, existe $w \in A$ tal que $\|z' - w\| \leq \epsilon$. Entonces $\|z - w\| \leq \|z - z'\| + \|z' - w\| \leq 2\epsilon$. Lo que contradice que

¹Sea (X, d) un espacio métrico, si toda sucesión de Cauchy en X converge, se dice que (X, d) es un espacio métrico completo.

$\overline{\mathbb{B}}_{2\epsilon}(z) \cap A = \emptyset$. Luego A' es no convexo y por tanto A es un conjunto abierto de (K^n, d_H) .

Con esto, (K_C^n, d_H) es también un espacio métrico completo [1]. El siguiente resultado aparece en [8], está dado para elementos de K_C^n , sin embargo en [6], se observa que para elementos de K^n funciona igualmente.

Proposición 2.5. Sea $\{K_m\}_{m \in \mathbb{N}}$ una sucesión en K_C^n que converge a K , además, sea

$$\lim_{m \rightarrow \infty} d_H(K_m, K) = 0,$$

entonces,

$$K = \bigcap_{i \geq 1} \overline{\bigcup_{m \geq i} K_m}$$

Prueba. Sea $\epsilon > 0$, $n \in \mathbb{N}$ y $x \in K$, entonces existe $m \geq n$ tal que $d_H(K_m, K) \leq \epsilon$, por la proposición 2.4, existe un punto $x_m \in K_m$ tal que $\|x - x_m\| \leq 2\epsilon$. Por consiguiente, $x \in \overline{\bigcup_{m \geq n} K_m}$ para cada $n \in \mathbb{N}$.

Sea $x \in \bigcap_{i \geq 1} \overline{\bigcup_{m \geq i} K_m}$, entonces para cada $p \in \mathbb{N}$ existe $m \geq p$ tal que $d(x, K_m) \leq \epsilon$. Así, si $n \geq p$, se tiene que:

$$d(x, K_n) \leq d(x, K_m) + d_H(K, K_m) \leq 2\epsilon,$$

entonces $x \in \bigcap_{i \geq 1} \overline{\bigcup_{m \geq i} K_m}$ para n , esto prueba que $K \subseteq \bigcap_{i \geq 1} \overline{\bigcup_{m \geq i} K_m}$.

Sea $x \in \bigcap_{i \geq 1} \overline{\bigcup_{m \geq i} K_m}$, de que la sucesión $\{K_m\}$ converge a K , se tiene que

$$d_H^*(K_m, K \cup \{x\}) = 0 \text{ cuando } m \rightarrow \infty,$$

además sea p tal que para $m, n \geq p$ implique $d_H(K_n, K_m) \leq \epsilon$. Del hecho que $x \in \bigcap_{i \geq 1} \overline{\bigcup_{m \geq i} K_m}$ se sigue que existe $m \geq p$ tal que $d(x, K_m) \leq \epsilon$, luego si $n \geq p$

$$d(x, A_n) \leq d(x, K_m) + d_H(K_m, K_n) \leq 2\epsilon,$$

con lo cual $d_H(K_n, K \cup \{x\}) = 0$ y luego $\bigcap_{i \geq 1} \overline{\bigcup_{m \geq i} K_m} \subseteq K$.

3. El espacio E^n

Definición 3.1. Un subconjunto difuso u de X , está determinado por una función $u : X \rightarrow [0, 1]$, que indica el grado de pertenencia o membresía de un elemento x en el conjunto u .

Es de aclarar, que en la teoría difusa se utilizan diferentes tipos de notaciones, en este caso, se siguen las ideas de [12], pero dado a las modificaciones que con el tiempo se han venido utilizando, se sigue la notación de [5].

Obsérvese que u generaliza la noción de función característica de un conjunto. Además, de acuerdo con [5], si $u(x) = 0$, x no pertenece al conjunto; si $u(x) = 1$, x pertenece al conjunto y si $0 < u(x) < 1$, se tiene que x pertenece de manera parcial, su grado de membresía es justamente $u(x)$

Un subconjunto A de B , se caracteriza, por tanto, por la función de pertenencia $A : B \rightarrow [0, 1]$, es preciso fijar el conjunto B para definir la función A , que a su vez define A . Por eso se habla de subconjunto difuso y no de conjunto difuso, (otros detalles en [12]); Ahora se presta atención a una colección particular de subconjuntos difusos de \mathbb{R}^n .

Sea E^n la colección de todos los subconjuntos difusos de \mathbb{R}^n que satisfacen:

1. El soporte² y los α -cortes³ de u son conjuntos compactos de \mathbb{R}^n , para todo $\alpha \in [0, 1]$,
2. u es convexo difuso, esto es, para $x, y \in \mathbb{R}^n$

$$u(\lambda x + (1 - \lambda)y) \geq \min \{u(x), u(y)\}$$

para todo $\lambda \in [0, 1]$.

Lema 3.1. Si $u \in E^n$, entonces se satisface

$$[u]^\alpha \in K_C^n \text{ para todo } \alpha \in [0, 1], \quad (1)$$

$$[u]^{\alpha_2} \subseteq [u]^{\alpha_1} \text{ para } 0 \leq \alpha_1 \leq \alpha_2 \leq 1 \quad (2)$$

y si $\{\alpha_k\}_{k \in \mathbb{N}}$ es una sucesión creciente que converge a α , entonces

$$[u]^\alpha = \bigcap_{k \geq 1} [u]^{\alpha_k}. \quad (3)$$

Recíprocamente, si $\{A^\alpha : 0 \leq \alpha \leq 1\}$ es la colección de subconjuntos de \mathbb{R}^n que satisface (1), (2) y (3), entonces existe un $u \in E^n$ tal que

$$[u]^\alpha = A^\alpha \text{ para } 0 < \alpha \leq 1$$

y

$$[u]^0 = \overline{\bigcup_{0 < \alpha \leq 1} A^\alpha} \subset A^0.$$

Prueba. Sea $u \in E^n$, por la definición de E^n , $[u]^\alpha$ es compacto para $\alpha \in [0, 1]$, resta entonces ver que $[u]^\alpha$ es convexo. Para $\alpha \in (0, 1]$, sean $x, y \in [u]^\alpha$, esto es, $u(x) \geq \alpha$ y $u(y) \geq \alpha$, entonces al ser u convexo difuso se tiene

$$u(\lambda x + (1 - \lambda)y) \geq \min \{u(x), u(y)\} \geq \alpha,$$

luego $(\lambda x + (1 - \lambda)y) \in [u]^\alpha$. Con lo cual se satisface (1).

Sean $0 \leq \alpha_1 \leq \alpha_2 \leq 1$, se sabe que

$$\begin{aligned} [u]^{\alpha_2} &= \{x \in \mathbb{R}^n : u(x) \geq \alpha_2\} \\ &\subseteq \{x \in \mathbb{R}^n : u(x) \geq \alpha_1\} \\ &= [u]^{\alpha_1}, \end{aligned}$$

con lo que se satisface (2).

Ahora sea $\{\alpha_k\}_{k \in \mathbb{N}}$ una sucesión creciente que converge a α , luego por (2), se tiene que

²Para un conjunto difuso u de \mathbb{R}^n , el soporte de u es $[u]^0 = \overline{\bigcup_{\alpha \in (0,1]} [u]^\alpha}$ [5]

³Para un conjunto difuso u de \mathbb{R}^n , el α -corte es $[u]^\alpha = \{x \in X : u(x) \geq \alpha\}$ para $\alpha \in (0, 1]$ [5]

$$[u]^{\alpha_1} \subseteq [u]^{\alpha_2} \subseteq \dots \subseteq [u]^{\alpha_k} \subseteq \dots \subseteq [u]^\alpha,$$

por otro lado, $[u]^{\alpha_k} \in K_C^n$, ahora aplicando la proposición 2,9, se tiene que esta sucesión converge a $A = \bigcap_{k \geq 1} [u]^{\alpha_k}$, con lo cual $[u]^\alpha = \bigcap_{k \geq 1} [u]^{\alpha_k}$, y (3) se sigue.

Recíprocamente, sea $\{A^\alpha : 0 \leq \alpha \leq 1\}$ la colección de subconjuntos de \mathbb{R}^n que satisface (1), (2) y (3); dado $x \in A^0$, se define $I_x = \{\alpha \in I : x \in A^\alpha\}$, y sea $\alpha_0 = \sup I_x$, de donde se obtiene que $I_x = [0, \alpha_0]$. En efecto, si $\alpha_0 = 0$, de inmediato $I_x = [0, \alpha_0]$, entonces se supone que $\alpha_0 > 0$ y sea $\beta \in (0, \alpha_0)$; luego existe $\beta_1 \in [\beta, \alpha_0]$ tal que $\beta_1 \in I_x$, así, dado que $x \in A^{\beta_1}$ implica por (2), $x \in A^\beta$ y $\beta \in I_x$, por definición $0 \in I_x$ y se obtiene que $[0, \alpha_0) \subseteq I_x$; ahora sea $\{\alpha_i\}_{i \in \mathbb{N}}$ una sucesión monótona en I_x que converge a α_0 , entonces $x \in A^{\alpha_i}$ para cada $i = 1, 2, \dots$ y por (3), $x \in A^{\alpha_0}$, así $\alpha_0 \in I_x$ y $[0, \alpha_0] \subseteq I_x$. Igualmente, dado $\beta \in I_x$ implica que $\beta \leq \alpha_0$, luego $I_x \subseteq [0, \alpha_0]$.

Se define $u : \mathbb{R}^n \rightarrow [0, 1]$ como $u(x) = \sup I_x$ para todo $x \in \mathbb{R}^n$, por consiguiente, sea $\alpha \in (0, 1]$, si $x \in [u]^\alpha$ entonces $u(x) \geq \alpha > 0$, así $x \in A^0$ y $u(x) = \sup I_x = \alpha_0 \geq 0$; por consiguiente, $x \in A^\alpha$ y por 2, $x \in A^\alpha$, esto es, $[u]^\alpha \subseteq A^\alpha$. Si $x \in A^\alpha$, entonces $u(x) = \sup I_x = \alpha_0 \geq \alpha$ y $x \in [u]^\alpha$. Por tanto $[u]^\alpha = A^\alpha$.

Construido lo anterior, se verifica que $u \in E^n$, en efecto, u es un conjunto difuso de \mathbb{R}^n por su definición, ahora $[u]^\alpha = A^\alpha \in K_C^n$ por (1), entonces $[u]^\alpha$ es compacto para todo $\alpha \in [0, 1]$. Finalmente, sean $x, y \in [u]^\alpha$ con $\min[u(x), u(y)] = \gamma \geq \alpha$, entonces $x, y \in [u]^\gamma$, que es convexo y así $\lambda x + (1 - \lambda)y \in [u]^\gamma$ para cualquier $\lambda \in [0, 1]$. Por consiguiente

$$u(\lambda x + (1 - \lambda)y) \geq \gamma = \min[u(x), u(y)]$$

lo que prueba que u es convexo difuso.

Al espacio E^n se le puede dotar una estructura para sus α -cortes, es expuesto con el siguiente concepto, cabe resaltar que los dos anteriores resultados son tomados de [8].:

Lema 3.2. Sean $u, v \in E^n$ entonces la adición⁴ $u \tilde{+} v$ y multiplicación por un escalar⁵ $\tilde{c}u$ difusa pertenecen a E^n , donde los α -cortes son definidos como:

$$[u \tilde{+} v]^\alpha = [u]^\alpha + [v]^\alpha \quad (4)$$

y

$$[\tilde{c}u]^\alpha = c[u]^\alpha \quad (5)$$

para $c \in \mathbb{R} - \{0\}$.

Prueba. Dado que $u, v \in E^n$, se satisfacen (1), (2) y (3), entonces $[u \tilde{+} v]^\alpha \in K_C^n$; sean $0 \leq \alpha_1 \leq \alpha_2 \leq 1$, entonces

⁴Dado que la suma de dos subconjuntos difusos no es clausurativa, por medio del principio de extensión de Zadeh se define la suma difusa $u \tilde{+} v : \mathbb{R}^n \rightarrow [0, 1]$ como $(u \tilde{+} v)(x) = \sup \{\min \{u(x_2), v(x_1)\} : x = x_1 + x_2\}$ [12].

⁵La multiplicación por escalar $c \in \mathbb{R}^n - \{0\}$ difusa $\tilde{c}v : \mathbb{R}^n \rightarrow [0, 1]$ es definida según el principio de extensión de Zadeh como $(\tilde{c}v)(x) = u(\frac{x}{c})$ [12].

$$[u\tilde{+}v]^{\alpha_2} = [u]^{\alpha_2} + [v]^{\alpha_2} \subseteq [u]^{\alpha_1} + [v]^{\alpha_1} = [u\tilde{+}v]^{\alpha_1};$$

sea $\{\alpha_i\}_{i \in \mathbb{N}}$ una sucesión creciente que converge a $\alpha > 0$ entonces

$$\begin{aligned} d_H([u\tilde{+}v]^{\alpha_i}, [u\tilde{+}v]^{\alpha}) &= d_H([u]^{\alpha_i} + [v]^{\alpha_i}, [u]^{\alpha} + [v]^{\alpha}) \\ &\leq d_H([u]^{\alpha_i}, [u]^{\alpha}) + d_H([v]^{\alpha_i}, [v]^{\alpha}) \end{aligned}$$

de donde $\lim_{i \rightarrow \infty} d_H([u\tilde{+}v]^{\alpha_i}, [u\tilde{+}v]^{\alpha}) = 0$, luego, por la proposición 2.5, $[u\tilde{+}v]^{\alpha} = \bigcap_{k \geq 1} [u\tilde{+}v]^{\alpha_k}$. De modo que $\{[u\tilde{+}v]^{\alpha} : \alpha \in I\}$ satisface (1), (2) y (3), por el teorema 3.1, $u\tilde{+}v \in E^n$.

Similarmente, $[\tilde{c}u]^{\alpha} \in K_C^n$; sean $0 \leq \alpha_1 \leq \alpha_2 \leq 1$, entonces

$$[\tilde{c}u]^{\alpha_2} = c[u]^{\alpha_2} \subseteq c[u]^{\alpha_1} = [\tilde{c}u]^{\alpha_1};$$

sea $\{\alpha_i\}_{i \in \mathbb{N}}$ una sucesión creciente que converge a $\alpha > 0$ entonces

$$\begin{aligned} d_H([\tilde{c}u]^{\alpha_i}, [\tilde{c}u]^{\alpha}) &= d_H(c[u]^{\alpha_i}, c[u]^{\alpha}) \\ &\leq |c| d_H([u]^{\alpha_i}, [u]^{\alpha}) \end{aligned}$$

de donde $\lim_{i \rightarrow \infty} d_H([\tilde{c}u]^{\alpha_i}, [\tilde{c}u]^{\alpha}) = 0$, luego por la proposición 2.5, $[\tilde{c}u]^{\alpha} = \bigcap_{k \geq 1} [u]^{\alpha_k}$. De modo que $\{[\tilde{c}u]^{\alpha} : \alpha \in I\}$ satisface (1), (2) y (3), por el teorema 3.1, $\tilde{c}u \in E^n$.

4. El espacio métrico (E^n, d)

Se procede al intersectar las dos teorías expuestas, se tiene el siguiente resultado, que ha sido difundido por variados autores, entre ellos V. Lakshmikantham em [8].

Lema 4.1. El par (E^n, d) con la métrica del supremo d en E^n definida como

$$d(u, v) = \sup \{d_H([u]^{\alpha}, [v]^{\alpha}) : \alpha \in [0, 1]\}$$

donde $u, v \in E^n$, es un espacio métrico.

Prueba. Sean $u, v, w \in E^n$, entonces

1. Para cada $\alpha \in [0, 1]$, dado que $d_H([u]^{\alpha}, [v]^{\alpha}) \geq 0$, luego por propiedades del supremo se obtiene que:

$$d(u, v) = \sup \{d_H([u]^{\alpha}, [v]^{\alpha}) : \alpha \in [0, 1]\} \geq 0$$

2. Sea $d(u, v) = 0$, entonces $\sup \{d_H([u]^{\alpha}, [v]^{\alpha}) : \alpha \in [0, 1]\} = 0$, por propiedades del supremo,

$$d_H([u]^{\alpha}, [v]^{\alpha}) = 0$$



para todo $\alpha \in [0, 1]$, luego $[u]^\alpha = [v]^\alpha$, entonces $u = v$.

Recíprocamente, si $u = v$ entonces $[u]^\alpha = [v]^\alpha$, luego

$$d_H([u]^\alpha, [v]^\alpha) = 0$$

así por propiedades del supremo, $\sup \{d_H([u]^\alpha, [v]^\alpha) : \alpha \in [0, 1]\} = 0$, luego $d(u, v) = 0$.

3. La simetría se satisface, en efecto,

$$\begin{aligned} d(u, v) &= \sup \{d_H([u]^\alpha, [v]^\alpha) : \alpha \in [0, 1]\} \\ &= \sup \{d_H([v]^\alpha, [u]^\alpha) : \alpha \in [0, 1]\} \\ &= d(v, u) \end{aligned}$$

4. Ahora se verifica la desigualdad triangular,

$$\begin{aligned} d(u, v) &= \sup \{d_H([u]^\alpha, [v]^\alpha) : \alpha \in [0, 1]\} \\ &\leq \sup \{d_H([u]^\alpha, [w]^\alpha) + d_H([w]^\alpha, [v]^\alpha) : \alpha \in [0, 1]\} \\ &\leq \sup \{d_H([u]^\alpha, [w]^\alpha) : \alpha \in [0, 1]\} + \sup \{d_H([w]^\alpha, [v]^\alpha) : \alpha \in [0, 1]\} \\ &= d(u, w) + d(w, v). \end{aligned}$$

Finalmente, se prueba:

Teorema 4.1. (E^n, d) es un espacio métrico completo

Prueba. Sea $\{u_k\}$ una sucesión de Cauchy en (E^n, d) , entonces $\{[u_k]^\alpha\}$ para cada $\alpha \in [0, 1]$, es una sucesión de Cauchy in (K_C^n, d_H) , que es un espacio métrico completo, así, existe un $C_\alpha \in K_C^n$ para cada $\alpha \in [0, 1]$ tal que

$$\lim_{k \rightarrow \infty} d_H([u_k]^\alpha, C_\alpha) = 0.$$

Se considera la colección $\{C_\alpha : \alpha \in [0, 1]\}$, y cada $C_\alpha \in K_C^n$ lo que satisface (1); sea $0 \leq \beta < \alpha \leq 1$, entonces

$$\begin{aligned} d_H^*(C_\alpha, C_\beta) &\leq d_H^*(C_\alpha, [u_k]^\alpha) + d_H^*([u_k]^\alpha, [u_k]^\beta) + d_H^*([u_k]^\beta, C_\beta) \\ &= d_H^*(C_\alpha, [u_k]^\alpha) + d_H^*([u_k]^\beta, C_\beta) \\ &\leq d_H(C_\alpha, [u_k]^\alpha) + d_H(C_\beta, [u_k]^\beta) \end{aligned}$$

con lo cual

$$d_H^*(C_\alpha, C_\beta) = 0$$

y esto indica, según la proposición 2.2, que $C_\alpha \subseteq C_\beta$, luego se satisface (2); sea $\{\alpha_i\}$ una sucesión decreciente en $[0, 1]$ que converge a α , con lo cual $C_\alpha \subseteq C_{\alpha_i}$ para $i = 1, 2, 3, \dots$, luego,



$$C_\alpha \subseteq \bigcap_{i=1} C_{\alpha_i},$$

ahora sea $x \in \bigcap_{i=1} C_{\alpha_i}$, así, $x \in C_{\alpha_i}$ para todo $i = 1, 2, 3, \dots$, entonces

$$\begin{aligned} d_H^*(\{x\}, C_\alpha) &\leq d_H^*(\{x\}, C_{\alpha_i}) + d_H^*(C_{\alpha_i}, C_\alpha) \\ &= d_H^*(C_{\alpha_i}, C_\alpha) \\ &\leq d_H^*(C_{\alpha_i}, [u_k]^{\alpha_i}) + d_H^*([u_k]^{\alpha_i}, [u_k]^\alpha) + d_H^*([u_k]^\alpha, C_\alpha), \end{aligned}$$

de modo que $d_H^*(\{x\}, C_\alpha) = 0$, por la proposición 2.2, $x \in C_\alpha$ y por consiguiente

$$\bigcap_{i=1} C_{\alpha_i} \subseteq C_\alpha.$$

Por tanto, se satisface la condición (3) de que

$$C_\alpha = \bigcap_{i=1} C_{\alpha_i}.$$

Entonces al satisfacer (1),(2) y (3), se aplica el teorema 3.1, con lo cual, existe un $u \in E^n$ tal que $[u]^\alpha = C_\alpha$ para todo $\alpha \in [0, 1]$. Además,

$$\begin{aligned} d_H([u_k]^\alpha, [u]^\alpha) &\leq d_H([u_k]^\alpha, [u_j]^\alpha) + d_H([u_j]^\alpha, [u]^\alpha) \\ &\leq \|u_k - u_j\| + d_H([u_j]^\alpha, [u]^\alpha) \\ &< \epsilon + d_H([u_j]^\alpha, [u]^\alpha) \end{aligned}$$

para todo $j, k \geq N(\epsilon)$, debido a que $\{u_k\}$ es una sucesión de Cauchy en (E^n, d) . Tomando el límite cuando $j \rightarrow \infty$, se obtiene

$$d_H([u_k]^\alpha, [u]^\alpha) \leq \epsilon$$

para todo $k \geq N(\epsilon)$ y $\alpha \in I$, por tanto $d(u, u_k) \leq \epsilon$ para todo $k \geq N(\epsilon)$ y (E^n, d) es un espacio métrico completo.

Los conceptos arriba expuestos, se extienden y profundizan en [8], [9] y [10] en donde el horizonte se amplía y abre lejanas perspectivas.

5. Comparación con otros espacios métricos

De las secciones anterior resultó un nuevo espacio métrico, la idea ahora es realizar una comparación con otros espacios métricos [11] relacionados con subconjuntos difusos.

Sean A, B subconjuntos difusos de un universo X cualquiera, la distancia de Hamming se define como

$$d(A, B) = \int_x |A(x) - B(x)|, dx,$$

la distancia euclídea como

$$d(A, B) = \sqrt{\int_x |A(x) - B(x)|^2 dx},$$

y la distancia de Tchebyshev como

$$d(A, B) = \sup_{x \in X} |A(x) - B(x)|.$$

Se resaltar que dichas distancias se encuentran entre dos subconjuntos difusos con el mismo universo X y se puede afirmar que cuanto mayor sea la similitud de los subconjuntos difusos, la distancia es menor.

En el espacio (E^n, d) solo intervienen subconjuntos difusos de \mathbb{R}^n con restricciones particulares ya expuestas, para estas tres distancias, no hay restricción alguna, así que se obtiene una bifurcación de los subconjuntos difusos, y por consiguiente no están muy relacionadas. Además la información obtenida de las tres distancias es muy débil, mostrando una cualidad muy general, que es grado de similitud de dos subconjuntos dados. Mientras que en el espacio (E^n, d) , se comparan los α -cortes con la métrica de Hausdorff, es decir, se le está dando análisis a cada $\alpha \in [0, 1]$.

Se presenta una situación en donde se calculan las cuatro distancias. Sean $u, v \in E^1$, como las figuras 1 y 2, y matemáticamente definidos de la siguiente forma:

$$u(x) = \begin{cases} 0 & \text{si } -\infty < x < 0 \\ 1 & \text{si } x = 0 \\ \frac{1}{2} & \text{si } 0 < x \leq 1 \\ 0 & \text{si } 1 < x < \infty \end{cases}$$

y

$$v(x) = \begin{cases} 0 & \text{si } -\infty < x < 0 \\ \frac{-x}{2} + 1 & \text{si } 0 \leq x \leq 1 \\ 0 & \text{si } 1 < x < \infty \end{cases}$$

De esta forma podemos decir que los α -cortes son

$$[u]^\alpha = [v]^\alpha = [0, 1] \text{ para } 0 \leq \alpha \leq \frac{1}{2},$$

$$[u]^\alpha = 0 \text{ para } \frac{1}{2} < \alpha \leq 1$$

y

$$[u]^\alpha = [v]^\alpha = [0, 2(1 - \alpha)] \text{ para } \frac{1}{2} < \alpha \leq 1$$



Figura 1. Representación gráfica del subconjunto difusos $u(x)$

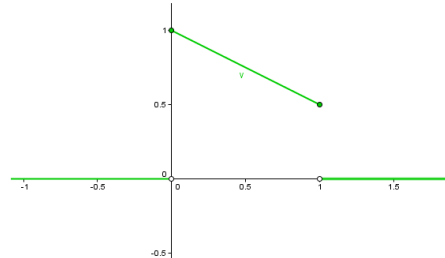


Figura 2. Representación gráfica del subconjuntos difusos $v(x)$

Luego se tiene que $d_H([u]^\alpha, [v]^\alpha) = 0$ para $\alpha \in [0, \frac{1}{2}]$ y $d_H([u]^\alpha, [v]^\alpha) = 2(1 - \alpha)$ para $\alpha \in (\frac{1}{2}, 1]$. Por tanto $d(u, v) = 1$.

Para las otras distancias se tienen los siguientes cálculos, para la distancia de Hamming

$$d(A, B) = \int_{\mathbb{R}} |u(x) - v(x)| dx = \int_0^1 \left| 1 - \left(\frac{-x}{2} + 1 \right) \right| dx = \frac{1}{4},$$

para la distancia euclídea

$$d(A, B) = \sqrt{\int_{\mathbb{R}} |u(x) - v(x)|^2 dx} = \sqrt{\int_0^1 \left| 1 - \left(\frac{-x}{2} + 1 \right) \right|^2 dx} = \frac{\sqrt{3}}{6},$$

y para la distancia de Tchebyshev

$$d(A, B) = \sup_{x \in \mathbb{R}} |u(x) - v(x)| = \sup_{x \in [0, 1]} \left| 1 - \left(\frac{-x}{2} + 1 \right) \right| = \frac{1}{2}.$$

Por los gráficos se observa que los subconjuntos difusos son similares y esto se ve representado en las tres distancias, ya que se acercan a 0. Mientras que con la métrica del espacio E^1 , no tienen relación, al realizar los cálculos, es necesario el análisis de los α -cortes, o sea que, en casos de aplicaciones, se tendrá que analizar parte por parte del subconjunto difuso, proporcionando más información de su significado.

6. Conclusiones

La construcción de la métrica de Hausdorff en \mathbb{R}^n es una edificación desde la definición de distancia entre un punto y un conjunto acotado no vacío, con ella se produce un nuevo espacio métrico completo (K^n, d_H) con los subconjuntos compactos de \mathbb{R}^n , que además se obtiene K_C^n , el conjunto

de compactos y convexos de \mathbb{R}^n , es un conjunto cerrado para este espacio métrico.

El espacio E^n tiene dos operaciones cerradas de adición y multiplicación por un escalar entre sus elementos, dado por el principio de extensión de Zadeh y las propiedades del espacio.

Al relacionar el espacio E^n y la métrica de Hausdorff, se enriquece la noción de la métrica de Hausdorff, obteniendo un espacio completo. Esta propiedad permite la utilidad en ambientes diferentes, lo que conlleva a otros rumbos de investigación.

Comparando con otras distancias entre subconjuntos difusos, se puede afirmar que en (E^n, d) se necesita analizar cada elemento del espacio para poder obtener su distancia con otro, luego es necesario un mayor detalle y con eso conocer mejor su naturaleza.

Referencias

- [1] T. M. Apostol. *Mathematical Analysis*. Addison-Wesley Publishing Company. Massachusetts. 1981.
- [2] M. Barnsley. *Fractals Everywhere*. Academic Press. San Diego. 1988.
- [3] P. Diamond y P. Kloeden. *Metric Spaces of Fuzzy Sets*. World Scientific. Singapore. 1994.
- [4] D. Dubois y H. Prade. *Fuzzy Sets and Systems: Theory and Applications*. Academic Press. 1980.
- [5] W. González. Una aproximación a los conjuntos alcanzables de una inclusión diferencial difusa. *Revista Integración*, vol. 30, núm. 1, 2012, pp. 57-74.
- [6] C. Castaing y M. Valadier. *Convex Analysis and Measurable Multifunctions*. Springer-Verlag. 1932.
- [7] E. Kreyszig *Introductory Functional Analysis with Applications*. John Wiley & Sons. Canada 1978.
- [8] V. Lakshmikanthan y R.N. Mohapatra. *Theory of Fuzzy Differential Equations and Inclusions*. Taylor y Francis. 2003.
- [9] J. Rodríguez-López y S. Romaguera. On completion of fuzzy metric spaces. *Fuzzy Sets and Systems*. Vol.130, 2002, pp.399-404-283.
- [10] J. Rodríguez-López y S. Romaguera. The Hausdorff fuzzy metric on compact sets. *Fuzzy Sets and Systems*. Vol.147, 2004, pp.273-283.
- [11] S. S. Silva. *Modelo Basado en Lógica difusa para la comparación de objetos con atributos imprecisos*. Universidad Centro Occidental Lisandro Alvarado. 2013.
- [12] L. A. Zadeh. *Fuzzy Sets*. Inf. Control 8. 1965.

Carlos Orlando Ochoa Castillo

Normalista Superior; Licenciado en Educación con Especialidad en Matemáticas y Física; especialista en Matemática Aplicada; Magister Scientiae – Matemáticas; ha sido coordinador de los programas de Matemáticas y Licenciatura en Matemáticas de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

Laura Victoria Forero Vega

Matemática de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas; magíster (c) en matemática aplicada en la Universidad de São Paulo, Brasil.

Complejidad e Ingeniería de Sistemas Complejos

La complejidad es un rasgo generalizado de la sociedad actual y de manera amplia de la vida; los altos niveles de interdependencia y, mejor aún, de interacción entre sistemas interdependientes, permiten que los sistemas se caractericen por el permanente surgimiento de nuevos estados de orden. Los cambios del sistema no pueden ser explicados a partir del comportamiento individual de las partes, sino que son el resultado de múltiples transformaciones estructurales y dinámicas que ocurren en el sistema o en cualquier sistema con el que interactúe.

El “brexit”, el ascenso de Trump, la crisis Grecia, los ataques terroristas en Europa, así como los eventos y situaciones que surgen del tráfico vehicular en ciudades, de la dinámica de las redes sociales e internet, son algunos ejemplos de la complejidad de la sociedad actual, en la que los fenómenos emergen de la interacción entre múltiples factores sociales, económicos, políticos, religiosos, culturales, tecnológicos, entre otros. Los altos niveles de interacción en los fenómenos complejos generan importantes implicaciones para su estudio y comprensión; de una parte ponen de manifiesto las limitaciones de ser comprendidos desde una única disciplina y, de otra, explican la dificultad de predicción: ¿podría entenderse, o mejor aún haber previsto el “brexit” como una consecuencia de la situación económica del Reino Unido?, ¿es posible predecir la viralidad que tendrá un comentario realizado en Twitter?, ¿la acreditación de alta calidad de la Universidad garantiza el buen desempeño de la institución o el éxito de sus egresados?, ¿por qué fracasan las empresas?

El rechazo a la formación disciplinaria reconoce que los avances de la ciencia exigen el surgimiento de cursos, profesiones e investigaciones caracterizadas por altos niveles de inter/trans/multidisciplinariedad y exalta la importancia de compartir abiertamente el conocimiento generado, de tal forma que los resultados puedan ser el punto de partida de nuevas investigaciones o puedan ser considerados en campos distintos a los inicialmente previstos.

Por su parte, dentro de los retos a la ingeniería se encuentra el diseño y desarrollo de propuestas que permitan resolver problemas de la sociedad, aprovechando la complejidad y complejización del entorno. Aprovechar la complejidad y la complejización significa abrazar la no linealidad y rechazar el reduccionismo y, de manera amplia, rechazar el enfoque mecanicista que ha marcado la forma como tradicionalmente se ha conducido la ciencia. El estudio y



Open access



Citación: L.E. Bohórquez, “Complejidad e Ingeniería de Sistemas Complejos,” INGENIERÍA, vol.21, no. 3, pp. 360-362, 2016.

© Los autores; titular de derechos de reproducción Universidad Distrital Francisco José de Caldas. En línea DOI: <http://dx.doi.org/10.14483/udistrital.jour.reveng.2016.3.ne02>

comprensión de los fenómenos complejos exige un rechazo al reduccionismo que caracteriza la formación disciplinaria dominante y plantea, entre otras cosas, retos a la Ingeniería, la cual tiene un importante campo de trabajo en la predicción y el control.

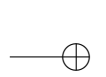
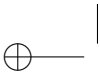
Sin lugar a dudas el estudio de los sistemas complejos a partir del aprovechamiento de la complejización del fenómeno es investigación de frontera (Pagels, 1991). Mientras que en el mundo real (política, economía, ingeniería, psicología, etc.) se reconoce que el todo es más que la suma de las partes y, en consecuencia, se habla de holismo, en el mundo de la Ingeniería de sistemas complejos se sabe que las partes cambian, se adaptan, evolucionan a través de múltiples espacios de posibilidades. De manera metafórica, mientras que la ciencia normal piensa que el rompecabezas logra resolverse a través de la adecuada articulación de las diferentes partes, la Ingeniería de sistemas complejos ha evidenciado que las partes del rompecabezas y el rompecabezas como un todo cambian permanentemente a medida que se va armando, y se adaptan conforme interactúan con otras piezas, con su armador, de manera amplia con el entorno; entonces ¿es posible a partir de conocimiento del estado inicial del problema en un momento determinado encontrar una solución?, ¿Qué tan confiables son los pronósticos que surgen del conocimiento de las condiciones iniciales de determinadas variables que influyen en el fenómeno objeto de estudio?

Los problemas complejos requieren soluciones complejas; es decir, soluciones adaptativas, inteligentes, que logren evolucionar en la misma medida en que evoluciona el problema. El reto es verdaderamente apasionante no solo por las implicaciones de los resultados, sino también por el campo de exploración que ofrece para nuevas interpretaciones y consecuentemente soluciones, de los problemas actuales que surgen de la complejidad y complejización de los fenómenos de la sociedad.

La Universidad Distrital Francisco José de Caldas, en consonancia con las exigencias del estudio y comprensión de fenómenos complejos, a través del grupo de investigación ComplexUD ha organizado y liderado desde el año 2006 el Encuentro Interuniversitario sobre Complejidad, en el que se han abordado temáticas alrededor de biología y sistemas complejos, complejidad y educación, sociedad y complejidad, entre otros. El próximo encuentro está programado para el primer semestre del año 2017 y su temática será Complejidad y Auto-organización.

Dada la madurez alcanzada en dicha iniciativa, el grupo ComplexUD junto la Revista INGENIERÍA han promovido divulgar a la comunidad académica este dossier con los resultados de las investigaciones y reflexiones que alrededor del estudio de sistemas complejos se han generado, tanto en la Universidad Distrital como en otras universidades y en el mismo Encuentro; buscando consolidar espacios que de manera periódica permitan a los amantes de la complejidad encontrar artículos que brinden nuevas luces para el estudio, comprensión y solución de problemas complejos.

En esta oportunidad incluimos estudios sobre el problema en que un sistema no complejo o lineal puede transformarse a través de la geometría de fractales en un sistema complejo o no lineal; las ventajas para la toma de decisiones, de la modelación de sistemas socio-ecológicos complejos a través de simulación basada en agentes; estudio de organizaciones empresariales como sistemas de complejidad creciente y sus implicaciones en la gestión; al igual que se presenta un modelo de encriptación simétrico extensible para comunicaciones digitales, aprovechando el caos generado



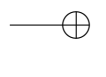
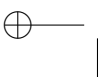
por sistemas dinámicos no lineales.

Esperamos lo disfruten.

Luz Esperanza Bohorquez Arévalo, Dr.

Editora Invitada

Agradecimientos: La editora Invitada ofrece sus más gratos agradecimientos al Profesor Sergio A. Rojas, PhD. (Editor de la Revista INGENIERIA) por la oportunidad de consolidar este dossier y por el apoyo brindado durante todo el proceso.



Artículo de reflexión

La Comprensión de las Organizaciones Empresariales y su Ambiente como Sistemas de Complejidad Creciente: Rasgos e Implicaciones

Understanding of Business Organizations and their Environment as Systems of Increasing Complexity: Features and Implications

Luz E. Bohórquez Arévalo¹

¹Profesor Asociado Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
Correo electrónico: lebohorqueza@udistrital.edu.co

Recibido: 19-11-2015. Modificado: 05-05-2016. Aceptado: 25-05-2016

Resumen

Contexto: La complejidad creciente de las organizaciones empresariales, y del entorno en el que actúan, ha llevado a que la corriente de pensamiento dominante para la comprensión de las organizaciones se tome insuficiente para dar respuesta a las condiciones cambiantes, y a la vez genere lentitud, inflexibilidad y fragilidad en la toma de decisiones, así como externalidades negativas tanto en el medio ambiente como en la sociedad. Una corriente alternativa con fundamento en las ciencias de la complejidad plantea que la adaptación vía auto-organización puede resolver este tipo de dificultades.

Método: En el documento se revisan las características de los sistemas de complejidad creciente y se identifican los elementos que explican su capacidad de auto-organización. A partir de esta revisión se plantean las implicaciones de comprender a las organizaciones como sistemas de complejidad creciente, las cuales se articulan con recientes investigaciones que en ingeniería organizacional y gestión buscan incrementar la capacidad de adaptación del sistema.

Resultados: Se desarrolla una apreciación sobre las implicaciones en la ingeniería organizacional de diseñar organizaciones empresariales con mayor capacidad para auto-organizarse y de manera amplia de aprovechar la complejidad creciente del entorno.

Conclusiones: La comprensión de las organizaciones empresariales como sistemas de complejidad creciente ofrece una perspectiva notoriamente distinta al paradigma tradicional el cual se han caracterizado por el enfoque reduccionista. A la fecha la investigación al respecto se encuentra en etapas tempranas y no existen modelos o evidencias empíricas que permitan corroborar de manera amplia y completa la fuerza de tales ideas. Sin embargo, los altos niveles de agilidad, flexibilidad y robustez que exhiben los sistemas auto-organizados permiten proyectar importantes campos de investigación alrededor del diseño de estructuras organizacionales flexibles, formas de gobernanza, toma decisiones en ausencia de controlador central, etc.

Palabras clave: Auto-organización, complejidad creciente, gestión, organización empresarial.

Idioma: Español



Citación: L.E. Bohórquez. "La Comprensión de las Organizaciones Empresariales y su Ambiente como Sistemas de Complejidad Creciente: Rasgos e Implicaciones," INGENIERÍA, vol.21, no. 3, pp. 363-377, 2016.

© Los autores; titular de derechos de reproducción Universidad Distrital Francisco José de Caldas. En línea DOI: <http://dx.doi.org/10.14483/udistrital.jour.reveng.2016.3.a07>

Abstract

Context: As a consequence of the increasing complexity of both, business organizations and the environment in which they operate, the current dominant trend of thought for understanding organizations is becoming insufficient to respond to changing conditions, and simultaneously generate slowness, inflexibility, and fragility in decision-making, as well as negative externalities both in the environment and in society. An alternative trend of thought with foundation in the sciences of complexity suggests that adaptation via self-organization can solve such difficulties.

Method: In the document the characteristics of the systems of increasing complexity are reviewed and elements that explain their capacity for self-organization are identified. On the basis of such review, the implications of understanding organisations as systems of increasing complexity are analyzed and articulated with recent research in organizational engineering and management that seek to increase the adaptability of the system.

Results: A reflection is made regarding the implications for organizational engineering about designing business organizations, with increased ability to self-organize and more broadly to benefit from the growing complexity of the environment.

Conclusions: Understanding business organizations as systems of increasing complexity offers a perspective notoriously different to the traditional paradigm which have been characterized by the reductionist approach. To this day the research on this is in its early stages, and there are no models and/or empirical evidence to corroborate broadly and completely the strength of these ideas. However, high levels of agility, flexibility and robustness that exhibit self-organized systems suggest considering interesting research questions regarding the design of flexible organizational structures, forms of governance, decisions-making in the absence of central control systems etc

Keywords: Increasing complexity, business organizations, self-organization, management.

1. Introducción

Los sistemas de complejidad creciente se caracterizan por la emergencia permanente de nuevas condiciones, patrones, comportamientos y, de manera amplia, información a partir de la interacción entre las partes [1], [2]. La expresión complejidad creciente busca exaltar el hecho que no todos los sistemas complejos incrementan su complejidad e incluso es posible identificar sistemas que la reducen.

El entorno empresarial es un sistema de complejidad creciente en el que permanentemente hay generación y ganancia de nueva información a partir de la interacción entre las organizaciones que lo componen (proveedores, clientes, entidades financieras, instituciones del estado, sociedad civil, etc.), puntualmente a partir de la interacción entre las personas que lo integran. La globalización y el desarrollo de las tecnologías de la información son algunos de los factores que permiten explicar la complejización del entorno [3]. A mayor interdependencia entre sistemas, organizaciones y personas, mayor será la ganancia y generación de nueva información (nuevas condiciones de mercado; cambios en las necesidades y gustos de consumidor; nuevas exigencias financieras y legales; cambios en el comportamiento de la moneda; crisis económicas, ambientales y financieras; entre otras situaciones que afectan la toma de decisiones).

La complejidad creciente del entorno empresarial ha llevado a que la corriente de pensamiento dominante para la comprensión de las organizaciones empresariales se torne insuficiente, a fin de dar respuesta a las condiciones cambiantes y generen lentitud, inflexibilidad y fragilidad en la toma de decisiones, así como externalidades negativas tanto en el medio ambiente como en la sociedad [4]. La expresión corriente de pensamiento dominante hace referencia a las teorías organizacionales y administrativas que usualmente enfatizan la importancia del orden y la estabilidad, así como las vías en las que pueden alcanzarse y mantenerse. Esta corriente usualmente se conoce como funcionalismo y ha sido predominante en el contexto académico y empresarial. La corriente dominante ha tratado de solucionar la lentitud, fragilidad e inflexibilidad para adaptarse a las condiciones cambiantes del entorno a partir de la búsqueda de óptimos. Sin embargo, si bien este enfoque ha permitido mejorar los niveles de eficacia y desempeño del sistema, no ha logrado superar las fallas anteriormente señaladas, principalmente porque la complejidad creciente hace que el problema cambie permanentemente y, en consecuencia, cambie el óptimo.

La optimización hace referencia a las vías para mejorar la forma en que se realizan las actividades al interior del sistema, entendiendo la optimización como un proceso continuo que debe promover el desarrollo de la organización. La búsqueda de resultados óptimos que caracteriza al paradigma dominante parte de la premisa de que es posible alcanzar futuros deseados (visión, escenario apuesta, objetivos, etc.) a partir de determinadas condiciones iniciales y se soporta en el uso del control como vía para reducir la variabilidad del entorno y homogenizar el sistema, a fin de alcanzar los resultados deseados.

La importancia del control en el contexto empresarial se explica por el carácter hipotético-deductivo que el paradigma dominante, para la comprensión de las organizaciones, ha tomado de las ciencias físicas y naturales [4]. De hecho la manera como las ciencias sociales trataron durante muchos años de desarrollar ciencia ha sido muy similar a las ciencias físicas y exactas [5].

El enfoque hipotético-deductivo del control conduce a que la comprensión tradicional de las organizaciones busque reducir la complejidad del sistema a través de diferentes mecanismos, como la división de la organización en conjuntos más simples que sugieran mayor maniobrabilidad (áreas funcionales, procesos, departamentos, tareas, etc.), la especialización de las partes en función del futuro deseado, la presencia de estructuras jerárquicas, la definición de estándares (reglas, procedimientos, códigos) [6], así como la identificación de factores de mérito o relevancia que expliquen el éxito del sistema [7]: un empresario es exitoso por su capacidad de liderazgo, la empresa es exitosa por el enfoque al cliente, un producto es exitoso por la estrategia de marketing, entre otros supuestos que pueden ser planteados desde la corriente de pensamiento dominante.

A la fecha diversas investigaciones han evidenciado que los sistemas auto-organizados se caracterizan por la agilidad, flexibilidad y robustez para ajustarse a las condiciones cambiantes del entorno [7], [8] y superar así la lentitud, inflexibilidad y fragilidad que caracteriza a las organizaciones empresariales. La auto-organización es un rasgo propio de los sistemas complejos y atañe a la emergencia de comportamientos emergentes a partir de la interacción entre las partes y en ausencia de controlador central, que determine el comportamiento del sistema [8]. De manera amplia se puede afirmar que el estudio de la auto-organización permite comprender la complejidad creciente que caracteriza los sistemas sociales [9]; de igual forma, el estudio de los sistemas sociales como siste-

mas de complejidad creciente permiten identificar elementos que subyacen a la auto-organización.

Es importante señalar que el estudio de los sistemas complejos y la auto-organización han sido ampliamente abordados en el presente milenio. A la fecha es posible identificar tres teorías de sistemas complejos que han sido consideradas en el estudio de los sistemas humanos: cibernética organizacional, sistemas adaptativos complejos (CAS) y ciencias de la complejidad [11]. Las tres teorías tienen elementos comunes en su origen (por ejemplo redes neuronales [12], cibernética [13]) y se ocupan del estudio de problemas relacionados pero distintos. Los problemas se hallan relacionados porque se orientan a la comprensión de sistemas no lineales. No obstante, la cibernética organizacional se enfoca en la viabilidad del sistema; los sistemas complejos adaptativos (CAS) buscan comprender la emergencia de comportamientos colectivos a partir de la interacción de las partes [1], [2] y las ciencias de la complejidad se ocupan de sistemas caracterizados por discontinuidades, en los que nuevos estados de orden emergen a través de la auto-organización entre las partes, incrementando la complejidad del sistema [7], [14], [15].

Los mayores aportes en la investigación en auto-organización se encuentran en las ciencias de la complejidad y los sistemas adaptativos complejos; a pesar de ello su desarrollo se ha focalizado en sistemas sociales naturales y artificiales (por ejemplo colonias de hormigas y autómatas celulares, respectivamente). En sistemas sociales humanos la investigación en auto-organización se encuentra en etapas tempranas. La única teoría de la complejidad que se enfoca en sistemas sociales humanos es la cibernética organizacional, pero su campo de estudio es la viabilidad del sistema; de hecho su principal propuesta se encuentra en el modelo de sistema viable de Stafford Beer [16], [17]. Lo anterior no significa que la cibernética organizacional desconozca la importancia de la auto-organización, la cuestión es que no ha sido su foco de trabajo.

El propósito del presente documento es promover la comprensión de la organización empresarial como sistema de complejidad creciente, a fin de desarrollar una apreciación sobre las implicaciones en la Ingeniería organizacional de diseñar organizaciones empresariales con mayores niveles de auto-organización. El enfoque teórico adoptado se soporta en los planteamientos que en auto-organización y complejidad han sido llevados a cabo, principalmente, desde las ciencias de la complejidad. Algunas de las ciencias de la complejidad son termodinámica del no equilibrio, ciencia de redes, teoría de fractales, teoría del caos, teoría de catástrofes, entre otras.

La aplicación de los planteamientos provenientes de las ciencias de la complejidad en la ingeniería organizacional señala un enfoque novedoso para la comprensión y diseño de las organizaciones empresariales. La novedad radica en el hecho de que las ciencias de la complejidad han tenido un notorio avance en la matemática y las ciencias de la computación, pero su aplicación en la ingeniería organizacional y la gestión ha sido escaso; de hecho el estudio realizado por Pollack, Adler & Sankaran [10] evidencia que tan solo desde el año 2002 se empiezan a encontrar con cierta frecuencia investigaciones que en estos campos se soportan en las ciencias de la complejidad, aclarando que usualmente están caracterizadas por el uso de expresiones metafóricas provenientes de la matemática, la física y la biología, principalmente.

Es importante señalar que existen otras aproximaciones al estudio de la complejidad como el pensamiento complejo y puntualmente los planteamientos de Edgar Morin. La obra de este autor se

inscribe en la mejor tradición francesa de la filosofía del sujeto. Su obra contiene amplios planteamientos orientados a modificar las relaciones del sujeto para con el mundo o la actitud del mundo para con la naturaleza [18]. En este artículo no se abordan los planteamientos de Morin, porque el interés no es sujeto, sino comprender cómo y por qué un sistema se complejiza y puntualmente cómo se auto-organiza.

Adicionalmente en este artículo no se incluye la teoría de los sistemas autopoiéticos. La auto-organización es ampliamente diferente a la auto-poiesis [19]. La autopoiesis se enfoca en los rasgos que permiten distinguir lo vivo de lo no vivo (orden-desorden), pero no aborda por qué un sistema adquiere un nuevo orden [20]. La confusión que usualmente se presenta entre estos dos términos obedece a la autonomía que exhiben los dos sistemas (para mayor información [21]).

Para el desarrollo del documento, en la primera parte se exploran algunos de los rasgos que permiten comprender la complejidad creciente de los sistemas y su capacidad de auto-organización. En la segunda parte se plantean las implicaciones de comprender a las organizaciones empresariales como sistemas de complejidad creciente y se articulan con recientes investigaciones que en ingeniería organizacional y gestión buscan incrementar la autonomía, la flexibilidad y adaptabilidad del sistema. Finalmente se plantea la discusión y las conclusiones.

2. Rasgos que permiten comprender la complejidad creciente de un sistema y su capacidad de auto-organización

Los sistemas de complejidad creciente se caracterizan por la ganancia y generación de información, la emergencia de propiedades distintas a las iniciales, el incremento permanente de los grados de libertad y, de manera amplia, la no linealidad del sistema; cuatro formas distintas de referirse a un mismo tema. A la fecha existen diferentes propuestas respecto a las características de los sistemas complejos [22], [23], [24], [25], aspecto que no es extraño si se tiene en cuenta la pluralidad de fenómenos que en sistemas sociales naturales, artificiales y humanos exhiben complejidad creciente. Sin embargo el interés de la investigación en sistemas complejos no es la formulación de listados de características acerca de por qué o cómo se complejizan los sistemas; principalmente porque su pretensión no es la unificación de lo diverso, ni convertirse en una teoría de todos los casos posibles [26]. La investigación en sistemas de complejidad creciente se enfoca al estudio de sistemas en los que las interacciones entre los agentes son difíciles de predecir y controlar. La dificultad de predicción y control responde a la ausencia de regularidad, que resulta de la interacción no lineal entre los agentes [2].

Las dinámicas que explican la complejidad creciente de un sistema, pueden ser abordadas desde dos perspectivas paralelas y complementarias [7]: dinámica del sistema y dinámica en el sistema. La primera, estrechamente relacionada con los factores estructurales del sistema y la segunda enfatiza la capacidad de adaptación coevolutiva.

Es posible identificar al menos tres factores que explican la dinámica del sistema: a) incremento o conexión de nuevos elementos al sistema; b) adición de nuevas conexiones entre las partes existentes; y c) aumento de la intensidad entre las conexiones. La interdependencia entre los com-

ponentes lleva a que el sistema exhiba comportamientos colectivos alejados del equilibrio, es decir que cambian permanentemente, lo que no significa que sean caóticos. Estos tres factores se encuentran presentes en las organizaciones empresariales y contribuyen a su complejización.

En las organizaciones empresariales, las personas continuamente rompen y crean vínculos con los demás. Los vínculos entre los individuos pueden ser fuertes o débiles (por ejemplo vínculos de amistad/familiaridad o simplemente de afiliación a un mismo grupo). La intensidad de las relaciones cambia con el tiempo, se debilita o se intensifica y claramente pueden presentarse, por diversas razones, situaciones de ingreso o retiro de personas del sistema [4].

Por su parte, la dinámica en el sistema enfatiza la adaptación coevolutiva que manifiesta el surgimiento de nuevos estados a partir de la interdependencia entre los componentes. A la fecha existen diferentes planteamientos que explican la dinámica en el sistema [14], [15]; que pueden ser agrupados en emergencia, auto-organización y evolución.

La emergencia se refiere al surgimiento de propiedades, que no estaban presentes en las condiciones iniciales, a partir de la interacción entre los componentes del sistema y hacen que sea imposible la predicción de estados futuros [27], [28]. La emergencia es una de las formas en las que puede ser considerada la incertidumbre del entorno [4].

La auto-organización se entiende como la emergencia de nuevo orden a partir de la interacción entre los componentes y en ausencia de controlador central que determine el comportamiento del sistema [8]. Las reglas de interacción entre las partes se ejecutan en información local, sin la referencia de patrones globales, los cuales son una propiedad emergente [29]. La emergencia y la auto-organización son dos características que se explican recíproca y necesariamente; sin emergencia no hay auto-organización y sin auto-organización no hay comportamientos emergentes.

La evolución es el proceso de cambio y transformación [30], [31] y puede ser caracterizada en términos de los comportamientos globales/colectivos que emergen de la interacción entre las partes. A medida que el sistema se auto-organiza permite la evolución de la organización a través de espacios de posibilidades que emergen de la interdependencia entre los componentes, lo que hace que sean difíciles de predecir y controlar.

Es importante señalar que los sistemas no solo evolucionan sino que coevolucionan con otros y con el entorno. La coevolución ha sido entendida como la mutua adaptación que surge como resultado de la influencia recíproca; los agentes influyen, son influidos, modifican el entorno y se ajustan a los cambios del mismo [32].

En el presente documento se hace especial atención la auto-organización del sistema por constituirse en el ápice que permite la emergencia de nuevos comportamientos y la evolución del sistema; es decir, facilita la complejidad creciente.

La dinámica del sistema y la dinámica en el sistema proporcionan el contexto que explica la complejización tanto del entorno, como de las organizaciones empresariales. La dinámica del sistema enfoca los cambios que pueden presentarse en la interdependencia entre las partes. Desde

esta perspectiva el rasgo más importante de los sistemas de complejidad creciente son las redes de libre escala [7]. Por su parte, la dinámica en el sistema evidencia la importancia de la emergencia de comportamientos a partir de la interacción entre los componentes, la ausencia de controlador central que determine el comportamiento del sistema, así como la evolución a través de espacios de posibilidades. Desde esta perspectiva el rasgo más importante de los sistemas complejos son las transiciones de fase [7].

Las redes de libre escala se constituyen en la regla y no la excepción de los sistemas de complejidad creciente [33]. Dichas redes se caracterizan porque los nodos pueden crecer en términos de enlaces, sin que haya un parámetro de escala que lo defina o limite. Algunos nodos pueden tener muchas conexiones y otros no; en consecuencia la distribución normal o la ley de los grandes números no son de utilidad para el estudio de este tipo de redes.

Las transiciones de fase hacen referencia a los cambios súbitos que mueven al sistema de un estado a otro. Tales cambios son pocos y esporádicos y coexisten con cambios de menor impacto (cambios continuos) que son frecuentes y numerosos en los sistemas complejos. La coexistencia de cambios súbitos y cambios continuos pone de manifiesto que dichos sistemas siguen distribuciones de leyes de potencia. El sistema físico más básico que exhibe este comportamiento son las pilas de arena cuando nuevos granos son adicionados. En la medida en que caen las partículas se van formando pequeños deslizamientos hasta llegar a un punto (nivel de criticalidad, valor crítico) en el que se produce una gran avalancha seguida de otras pequeñas hasta llegar nuevamente a un valor crítico [34]. Las leyes de potencia son propias de los sistemas caracterizados por la interdependencia e interacción entre los agentes que los componen; cuando hay independencia entre los agentes, los fenómenos presentan distribuciones normales o con tendencia a la normal [35].

3. Implicaciones de comprender a las organizaciones empresariales como sistemas de complejidad creciente

El principal aporte del presente documento es desarrollar una apreciación sobre las implicaciones en la ingeniería organizacional de diseñar organizaciones empresariales con mayores niveles de auto-organización; es decir el documento plantea algunas de las transformaciones que se deberían dar en las organizaciones empresariales a fin de incrementar la capacidad para aprovechar la complejidad creciente del entorno. Lo anterior se encuentra en clara oposición con la corriente de pensamiento dominante para la comprensión de las organizaciones, la cual ha buscado reducir la complejidad tanto del sistema como del entorno.

Las organizaciones empresariales son sistemas de complejidad creciente, que históricamente han sido diseñadas y gestionadas a través de las teorías, modelos y prácticas deterministas, lineales y reduccionistas, bajo el supuesto de facilitar la maniobrabilidad del sistema y puntualmente la identificación de soluciones óptimas.

El determinismo implica que todo acontecimiento es generado por una(s) causa(s) o factores de éxito que hacen que el futuro del sistema (visión, escenario apuesta, objetivos, entre otros) pueda ser planeado. La linealidad asume que la organización y los problemas que se manifiestan en esta

tienen una única alternativa de solución y, en consecuencia, es necesario definir la ruta óptima que permite alcanzarla. El reduccionismo, por su parte, asume que es posible dividir la organización en partes, aislarla del entorno e identificar las relaciones de mayor importancia, como aspectos claves para facilitar la comprensión del sistema.

Desde la corriente de pensamiento dominante la realidad social no cambia o lo realiza lentamente. Las teorías organizacionales que se enmarcan en esta perspectiva mantienen la idea que la lenta tasa de cambios del entorno permite determinar el modo en que se presentará el futuro y por tanto los comportamientos del sistema pueden ser planeados y controlados.

La comprensión de las organizaciones como sistemas de complejidad creciente y, más exactamente como sistemas con capacidad de auto-organización, exige de manera notoria el rechazo al reduccionismo, la linealidad y el determinismo del paradigma dominante; y se constituye en un nuevo paradigma, que busca aprovechar y permitir la complejización del sistema. Lo anterior bajo la premisa de que solo la complejidad puede absorber la complejidad [36]; en otras palabras, la complejidad del entorno (oportunidades, retos, desafíos que surgen de la interdependencia entre los componentes) solo puede ser aprovechada en la medida en que la organización empresarial tenga la complejidad requerida.

Las investigaciones adelantadas en sistemas sociales naturales y artificiales, han evidenciado que la capacidad del sistema para absorber o adaptarse a la complejidad explica los altos niveles de agilidad, flexibilidad y robustez para actuar en entornos altamente cambiantes [7], [8]. La agilidad hace referencia a la capacidad de generar decisiones oportunas; la flexibilidad denota la maleabilidad de sistema para cambiar; y la robustez es la capacidad del sistema para recuperarse y continuar operando a pesar de las fallas que se presenten a nivel individual.

En la medida en que la organización aprovecha la complejidad del entorno aumentan las posibilidades a través de las que puede evolucionar. El avance del sistema hacia ese adyacente posible brinda oportunidades para el incremento permanente de la diversidad y de manera amplia de la complejidad [2]. En la medida en que el sistema se diversifica se generan transformaciones de un estado de características homogéneas a otro de distintas características al anterior [15], lo que le permite a la organización no solo ajustarse a las condiciones cambiantes del entorno, sino también modificarse y modificar el entorno, de manera ágil, flexible y robusta.

Los rasgos que facilitan la comprensión del porqué un sistema se hace complejo, ofrecen una perspectiva para identificar las implicaciones de diseñar organizaciones empresariales con mayores niveles de auto-organización. En la Tabla I se listan algunos de los rasgos, señalados en el anterior apartado, que explican la complejización de los sistemas y se plantean los alcances que generan en el diseño de organizaciones empresariales.

Los rasgos que explican la complejidad creciente, señalados en la Tabla I, implican en primera instancia reconocer que los comportamientos emergentes (innovaciones, respuestas creativas a las problemáticas del entorno, etc.) surgen a partir de la interacción entre las partes. En la medida en que se facilite la interacción entre las personas mayor cantidad de comportamientos emergentes hay y, así, mayor capacidad para aprovechar la complejidad del entorno. Promover la interacción entre

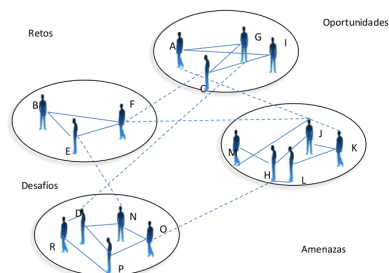
Tabla I. Rasgos que explican la complejidad creciente de un sistemas y sus implicaciones para la comprensión de las organizaciones empresariales.

| Rasgos que explican la complejidad creciente | Implicaciones para la comprensión de las organizaciones empresariales |
|--|--|
| Interdependencia entre los componentes | Estructuras organizacionales en redes que facilitan la interacción entre las personas |
| Emergencia de comportamientos colectivos a partir de la interacción entre las partes | Los procesos de planeación organizacional y, en general los enfoques predictivos son limitados para determinar <i>ex ante</i> el desempeño de sistema. |
| Ausencia de controlador central que determine el comportamiento del sistema | El liderazgo es emergente; no es determinado, elegido o designado. |
| Evolución del sistema a través de espacios de posibilidades | El acto fundacional de las organizaciones empresariales es la adaptabilidad |

las personas exige repensar las estructuras organizacionales. La tradicional estructura jerárquica reduce la posibilidad de interacción, a través del establecimiento de líneas de autoridad y comunicación; y, en consecuencia, limita los niveles de creatividad del sistema. A la fecha se han realizado importantes propuestas al respecto [37], [38], [39]; la tendencia ha sido aprovechar las redes informales que emergen en las organizaciones empresariales y que exaltan los lazos sociales que surgen entre los empleados como resultado de la afiliación a diferentes grupos o contextos (amistad, hobbies, intereses compartidos, etc.). Las redes informales promueven la confianza, el intercambio de conocimientos, la lealtad, facilitan la cooperación, la creatividad, entre otras situaciones que se consideran favorables para el desempeño organizacional [38].

La emergencia de comportamientos colectivos a partir de la interacción entre las partes evidencia que los comportamientos del sistema no surgen como resultado de procesos de planeación, como lo plantea la corriente dominante; por ello, no pueden ser predeterminados o definidos por un controlador central (líder, estratega). La dificultad de predicción que impone la complejidad creciente exige buscar alternativas para comprender cómo emergen las decisiones empresariales en entornos de alta incertidumbre, a través de enfoques distintos a la planeación tradicional o a la identificación de factores de mérito o relevancia.

Al respecto, la ciencia de redes plantea que la emergencia de comportamientos colectivos surge cuando existe Agrupamiento Percolante Vulnerable (APV) que permita la propagación de la información a través de la red [7]. Un APV es un grupo de nodos susceptibles relacionados por vínculos abiertos que se evidencia por toda la población. Un APV en el contexto organizacional hace referencia a un grupo de personas susceptibles de aceptar una propuesta de acción realizada por otra, que se encuentran en interacción y permite que emerjan comportamientos que se visualizan por todo el sistema.

**Figura 1.** Ejemplo de interacción y propagación de propuestas de acción en las organizaciones humanas.

En la Figura 1, se visualiza una organización distribuida en cuatro equipos. Las personas no solo interactúan con los miembros de su equipo (líneas sólidas), sino también con personas de otros equipos (líneas punteadas), pero no todos interactúan con todos y tampoco tienen igual número de interacciones. Por ejemplo la persona A, interactúa con G y K; la persona D, interactúa con G, N, P, R. Las interacciones surgen por redes de afiliación (por ejemplo participan en el

mismo equipo, son amigas, comparten información, etc.). El entorno de la organización se encuentra caracterizado por la presencia de retos, amenazas, oportunidades, desafíos, de manera amplia problemas que estimulan la generación de ideas/propuestas de acción de los miembros de la organización. En este contexto la propuesta de acción realizada por A se puede convertir en actuación conjunta en la medida en que logre influir, por ejemplo a J, este a su vez influya F, que a su vez influye a B, que su vez influye a E, este a su vez influye a N y este a O, que influye a su vez a H y este a L, y este a K, y así sucesivamente, permitiendo que la propuesta se propague por amplia proporción de la red, lo que no significa que todos hayan sido influidos de la misma manera, en la misma medida o que exista consenso. Tampoco significa que A sea el líder o el estratega, pues también hubiera podido propagarse la propuesta de M, D o de otra persona. En este ejemplo A, J, F, B, E, N, O, H, L y K, se constituyen en un Agrupamiento Percolante Vulnerable, en la medida en que son susceptibles de aceptar la propuesta de acción y se encuentran en interacción.

Es importante señalar que a la fecha la investigación se encuentra abierta respecto a los factores que inciden en la susceptibilidad de una persona a aceptar una propuesta de acción y por ende generar comportamientos colectivos. Es posible identificar tres importantes teorías al respecto: desde matemática se plantea la teoría de juegos, desde la economía la teoría de la decisión racional y desde la ciencia política la teoría de la cooperación; adicionalmente se encuentran importantes planteamientos realizados desde la sociología [40], [41], [55]. A pesar de la pluralidad de propuestas es posible identificar el poder, la confianza entre las partes, el grado de conectividad del individuo, así como las creencias (egoísmo, altruismo) como algunos de los aspectos que marcan la susceptibilidad del individuo a aceptar la propuesta realizada por otro [42].

La comprensión de las organizaciones y los comportamientos que en estas emergen como sistemas de redes que favorezcan la interacción entre las personas y actúen en ausencia de controladores centrales que determinen el comportamiento, exige repensar a las organizaciones desde perspectivas descentralizadas, pluralistas, que favorezcan la diversidad y la autonomía. De manera amplia exige pasar de sistemas caracterizados por el uso de control a sistemas en los que se favorece la interacción para la auto-organización. Investigaciones recientes en Ingeniería organizacional [43], [44], han planteado la importancia e impacto en el desempeño empresarial de la descentralización para la toma de decisiones, las bondades de las heterarquías (en oposición a las jerarquías estables de poder), en las que las propuestas de acción surgen de personas con información relevante en la problemática abordada (pudiendo ser cualquier persona del sistema), e incluso la importancia de comprender las organizaciones como redes conformadas no solo por los empleados, sino por los grupos de interés y en donde las decisiones surgen con participación de estos [46], [56], [58]. De manera amplia, está planteando la relevancia de repensar los tradicionales esquemas de gobernanza empresarial [45] y rediseñar las organizaciones empresariales, superando los esquemas tradicionales de división por áreas funcionales, procesos, departamentos, etc., a pensar organizaciones configuradas por redes de sistemas y mayores niveles de flexibilidad [57].

La comprensión de la organización como sistema de complejidad creciente implica abandonar el enfoque financiero y rentabilista que ha caracterizado la gestión empresarial y permitir que la organización navegue a través de los espacios de posibilidades que surgen de la complejidad del entorno (adaptación coevolutiva). La determinación *ex ante* de un grupo de objetivos (financieros o no) reduce las posibilidades hacia las que puede evolucionar la organización; es decir, la lleva a

desaprovechar oportunidades emergentes, a la vez que incrementa las externalidades negativas [47] (consumismo, contaminación, agotamiento de los recursos naturales, etc.) Lo anterior no significa que la generación de rentabilidad no sea importante, pues de hecho en el modelo económico dominante es una condición para la viabilidad del sistema, lo que implica es que su relevancia cambia en el tiempo. Una propuesta alternativa, al respecto, es enfocar la organización hacia horizontes que permitan incrementar los grados de libertad del sistema; por ejemplo viabilidad, adaptabilidad, aprendizaje, entre otros. Resaltando que estos resultados no pueden ser planeados *ex ante*, sino que son una condición emergente del sistema.

Finalmente la comprensión de la organización empresarial como sistema de complejidad creciente exige nuevas técnicas para su estudio e investigación. La dificultad de solución matemática que caracteriza los sistemas conformados por grandes número de agentes con patrones de interacción cambiantes, ha estimulado el uso de la modelación basada en agentes como alternativa para facilitar su comprensión [48]. Este tipo de modelación ha adquirido amplia relevancia en los últimos años por la facilidad que brinda para el estudio de agentes adaptativos más que racionales o enfocados a la optimización. El propósito de los modelos es facilitar la exploración de todas las alternativas posibles.

A la fecha no existen organizaciones empresariales en el mundo real que aborden en su conjunto los distintos rasgos señalados; pero sí se encuentran organizaciones que estén trabajando sobre algún rasgo en particular y cuyos resultados reflejan mejores desempeños en comparación con las organizaciones tradicionales. Buurtzorg es una compañía holandesa que presta servicios de enfermería domiciliarios, fundada en el año 2006 opera en esquemas completamente descentralizados, incluso para la facturación (cada enfermera elabora sus propias facturas). Según estudios realizados la compañía presenta los mayores niveles de satisfacción de los empleados, en comparación con otras firmas holandesas, y tiene la menor estructura de costos, lo que incrementa su competitividad [49]. También se encuentra el caso de la compañía de tomates Morning Star en California, caracterizada por la ausencia de jefes “nadie es jefe de nadie”, donde aspectos como la definición de salarios se realiza a través de comités de pares que no son elegidos por votación sino por manifestación explícita de la persona que desea participar o desea un aumento salarial. En esta empresa cualquier persona puede tomar decisiones, incluso financieras; la única condición es que haya consultado con expertos que emergen en la organización y que ganan reputación en la medida en que resultan exitosas las decisiones tomadas [49]. Otros casos pueden ser consultados en los trabajos de Turnbull [50], en los que se estudian empresas que tienen esquemas de gobernanza caracterizadas por redes recursivas (varias unidades de control y activa participación de los grupos de interés) que presentan mejores desempeños que empresas caracterizadas por esquemas tradicionales.

Adicionalmente, es posible verificar la fortaleza de los planteamientos realizados en este documento a través de realidades virtuales, puntualmente simulaciones computacionales. La simulación basada en agentes desarrollada por [51], evidencia que las organizaciones auto-organizadas son más ágiles para aprovechar las oportunidades y amenazas que surgen en el entorno en comparación con empresas jerárquicas, en las que las decisiones emergen a través de estructuras de poder. De igual forma, la simulación basada en agentes desarrollada por [52] muestra que las organizaciones descentralizadas presentan mayor capacidad de adaptación al entorno que las centralizadas.

4. Discusión y conclusiones

El diseño de organizaciones empresariales con características que otorguen mayores niveles de auto-organización permitiría aumentar la complejidad del sistema y por tanto absorber y aprovechar de manera ágil, flexible y robusta la complejidad del entorno. Esta propuesta ofrece una lógica notoriamente distinta al paradigma tradicional para la comprensión de las organizaciones. El paradigma tradicional busca reducir la complejidad del sistema a fin de facilitar la toma de decisiones y promover el cumplimiento de determinados objetivos; el nuevo paradigma se orienta a aumentar la complejidad y facilitar el surgimiento de nuevos comportamientos que le permitan a la organización reformarse, modificar el entorno y adaptarse a las condiciones cambiantes del ambiente en el que se encuentra.

Es importante señalar que el presente documento identifica algunas de las implicaciones para la ingeniería organizacional de comprender a las organizaciones empresariales como sistemas con capacidad para auto-organizarse. Estos planteamientos constituyen un primer acercamiento al diseño de un modelo para la auto-organización empresarial, el cual debe ser lo suficientemente flexible para permitir que las organizaciones naveguen a través de espacios de posibilidades; es decir un modelo de auto-organización no puede ser taxativo y sus planteamientos son enunciativos o ejemplificativos.

La comprensión de las organizaciones empresariales como sistemas de complejidad creciente le permitiría a la ingeniería organizacional no solo diseñar organizaciones con mayor capacidad para aprovechar la complejidad del entorno, sino que adicionalmente podría realizar importantes aportes a las ciencias de la complejidad en lo referente a la investigación en sistemas sociales humanos. Lo anterior considerando que, si bien los sistemas sociales naturales y sistemas sociales artificiales en los que se encuentran los mayores avances en las ciencias de la complejidad son complejos, sin lugar a dudas los sistemas sociales humanos exhiben los mayores niveles de complejidad, por la interdependencia que han generado las tecnologías de la información, la globalización, la heterogeneidad de los individuos, entre otros aspectos.

La comprensión de las organizaciones empresariales como sistemas de complejidad creciente proyecta amplios espacios de investigación, dentro de los cuales se encuentran: a) diseño de estructuras organizacionales que promuevan la interacción entre las personas y superen las fallas de las estructuras jerárquicas burocráticas; b) toma de decisiones en ausencia de controlador central (líder, estratega) que determine y limite el comportamiento del sistema; y por tanto desaproveche las condiciones emergentes del entorno; c) emergencia de comportamientos colectivos en organizaciones empresariales que actúan como sistemas auto-organizados; d) identificación de técnicas para simulación de organizaciones empresariales como sistemas de complejidad creciente y en consecuencia que absorban amplios niveles de complejidad; e) evaluación del desempeño de la organización empresarial que evoluciona a través de posibilidades; y por tanto que no tiene objetivos predefinidos que reduzcan su actuación; f) modelos de evolución organizacional del paradigma dominante a la organización como sistema de complejidad creciente; g) modelos de auto-organización para el desarrollo de ciertas actividades en las organizaciones como la gestión de presupuesto, la cual se ha caracterizado por el uso de mecanismos ampliamente reduccionistas como la planeación, la centralización, entre otros, y que permita llegar a la despresupuestación del sistema.

Es importante señalar que si bien el presente documento se centra en las organizaciones empresariales, los planteamientos aquí señalados pueden ser escalables a otros sistemas humanos y permiten el estudio desde otras perspectivas de aspectos como: a) las crisis independientemente del sistema (económico, social, financiero, cultural, tecnológico) o escala en la que se manifiesten (mundial, regional, local, sectorial, empresarial). Lo anterior partiendo de la premisa de que las crisis son discontinuidades del sistema, que si bien son difíciles de predecir son esperables por los altos niveles de interdependencia del entorno (globalización, tecnologías de la información, etc.); b) la formulación de política pública, debido a la dificultad de predecir su impacto, no solo en el sistema en el que se formula sino en otros sistemas en interacción y a su relevancia en el bienestar de la sociedad.

La comprensión de las organizaciones empresariales como sistemas de complejidad creciente implica el rechazo al reduccionismo que ha caracterizado la formación disciplinaria. Usualmente la oferta académica se caracteriza por cursos claramente delimitados, en los que cada ciencia tiene su propia parcela y existe una modesta superposición entre ellos [53]. Sin embargo el avance del conocimiento ha generado un sorprendente fenómeno de convergencia que lleva al surgimiento de nuevas materias y profesiones (Gell-Man (1984), citado por [53]), así como la construcción de comunidades de conocimiento inter/trans/multidisciplinarias. Los fenómenos complejos, como claramente son las organizaciones empresariales, requieren de más de un método para investigarlos adecuadamente [54].

Finalmente, es necesario señalar que la principal restricción que los planteamientos realizados en el presente documento tienen en la actualidad es la servidumbre de la gestión empresarial al modelo económico dominante, que se visualiza en la importancia que para las organizaciones empresariales tiene el enfoque financiero y rentabilista. Adicionalmente un nuevo paradigma para la comprensión de las organizaciones es difícil de aceptar. Un importante porcentaje de personas están acostumbradas a creer que el éxito se explica por factores de mérito o relevancia (por ejemplo calidad, liderazgo, innovación, etc.), a que cada efecto tiene sus causas (ejemplo la calidad aumenta la satisfacción del cliente), a que una organización sin controlador central (líder/estratega/objetivo) está en caos. Sin embargo, las fallas generadas por el paradigma dominante para la comprensión de las organizaciones ratifican la necesidad de un cambio en la forma de comprender a las organizaciones.

Referencias

- [1] J. H. Holland, "Complex adaptive systems". *A New Era in Computation*, 121(1), 1992, pp. 17-30.
- [2] M. Gell-Mann, "Complex adaptive systems". *Complexity: Metaphors, Models and Reality* (pp. 17-45). Mexico: Addison-Wesley, 1994.
- [3] D. Helbing, "Globally networked risks and how to respond". *Nature*, 497, 2013, pp. 51-59.
- [4] L. E. Bohórquez Arévalo, *Diseño de un modelo conceptual de auto-organización para el logro de actuaciones conjuntas en las organizaciones empresariales*. (Doctorado Tesis Doctoral), Universidad Colegio Mayor de Nuestra Señora del Rosario, 2014.
- [5] C. E. Maldonado, "Complejidad de los sistemas sociales: Un reto para las ciencias sociales". *Cinta Moebio*(36), 2009, pp. 146-157.
- [6] D. S. Alberts, & R. E. Hayes, *Power to the edge: Command, control in the information age*. Washington: CCRP, 2003.

- [7] D. J. Watts, *Seis grados de separación. La ciencia de las redes en la era de acceso*. Barcelona: Paidós, Iberica, S.A., 2006.
- [8] S. Camazine, J. Deneubourg, N. Franks, J. Sneyd, G. Theraulaz & E. Bonabeau, *Sel-organization in biological system*. United Kingdom: Pricenton University Press, 2003.
- [9] L. E. Bohórquez, "La organización empresarial como sistema adaptativo complejo". *Estudios gerenciales*, 29(127), 2011, pp. 258-265, 2011.
- [10] J. Pollack, D. Adler & S. Sankaran, "Mapping the field of complexity theory: A computational approach to understanding changes in the field". *Emergence: Complexity and Organization*, 16(2), 2014, pp. 74-92.
- [11] L. E. Bohórquez & A. Espinosa, "Theoretical approaches to managing complexity in organizations: A comparative analysis". *Estudios Gerenciales*, 31(134), 2015, pp. 20-29.
- [12] W. S. McCulloch & W. Pitts, "A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity". *The bulletin of mathematical biophysics*, 5(4), 1943, pp.115-133.
- [13] N. Wiener, *Cybernetics: Or, Control and Communication in the Animal and the Machine*. Cambridge: MIT press, 1961.
- [14] G. Nicolis & I. Prigogine, *La estructura de lo complejo: en el camino hacia una nueva comprensión de las ciencias*. México: Alianza Editorial, 2007.
- [15] S. A. Kauffman, *At home in the universe: the search for laws of self-organization and complexity*: Oxford University Press US, 1995.
- [16] S. Beer, *Brain of the firm*. New York: John Wiley & Sons, 1981.
- [17] S. Beer, "The heart of enterprise". New York: John Wiley & Sons, 1998, pp. 20-29.
- [18] C. Maldonado & N. Gómez, *El mundo de las ciencias de la complejidad. Una investigación sobre qué son, su desarrollo y posibilidades*. Bogotá D.C.: Universidad del Rosario, 2011.
- [19] G. Di Marzo Serugendo, M.-P. Gleizes & A. Karageorgos, *Self-organising software: From natural to artificial adaptation* (1a. ed.). Springer, 2011.
- [20] P. Luigi Luisi, *La vida emergente* (1 ed.). (A. García Leal, Trad.) Barcelona: Matemas, 2010.
- [21] J. Brocklesby & J. Mingers, "The use of the concept autopoiesis in the theory of viable systems". *Systems Research and Behavioral Science*, 22, 2005, pp. 3-9.
- [22] P. Bak, *How nature works: the science of self-organized critically*. New York: Springer-Verlag, 1996.
- [23] G. Cowan, P. David & M. David, *Complexity: metaphors, models, and reality*: Addison Wesley Longman, 1994.
- [24] F. Cramer, *Chaos and order: The complex structure of living things*. New York: Free Press, 1993.
- [25] M. Bedau, J. McCaskill, N. Packard & S. Rasmussen, "Living Technology: Exploiting Life's Principles in Technology". *Artificial Life*, 16(1), 2010, pp. 89-97.
- [26] C. Maldonado, *Termodinámica y Complejidad: Una introducción para las ciencias sociales*. Bogotá, D.C., 2011.
- [27] J. H. Holland, *Emergence: From chaos to order*: Helix Books, 1998.
- [28] V. Vesterby, *Origins of self-organization, emergence and cause* (Vol. 3). Unite States of America: ISCE Publishing, 2008.
- [29] E. Bonabeu, M. Dorigo & G. Theraulaz, *Swarm Intelligence: From natural to artificial system*. New York: Santa Fe Institute- Studies in the sciences of complexity, 1999.
- [30] C. Darwin, *El origen de las especies* (A. Froufre, Trans.). México: EDAF, 2010.
- [31] S. J. Gould, *La estructura de la teoría de la evolución*. Barcelona: Metatemas, 2010.
- [32] S. Maguire, B. McKelvey, M. Laurent & N. Öztas, "Complexity Science and Organization Studies". *The Sage Handbook of Organization Studies* (pp. 165-214). London: Sage Publications, 2006.
- [33] A.-L. Barabási, *Bursts: the hidden patterns behind everything we do, from your email to bloody crusades*. New York: Penguin Books Ltd., 2010.
- [34] P. Bak, C. Tang & K. Wiesenfeld, "Self-organized criticality". *Physica Review*, 38(1), 1988, pp. 364-373.
- [35] B. West & B. Deering, *The Lure of Modern Science: Fractal Thinking*. Singapore.: World Scientific, 1995.
- [36] R. Ashby, *Design for a brain: the origen of adaptative behaviour*: Springer Science, 1960.
- [37] Adam M. Kleinbaum, T. E. S., Michael L. Tushman, "Discretion Within Constraint: Homophily and Structure in a Formal Organization". *Organization Science*, 24(5), 2015, pp.1316-1336.
- [38] S. M. Biancani, A. Daniel & L. Dahlander, "The Semiformal Organization". *OrganizationScience*, 25(5), 2014, pp. 1306- 1334.
- [39] N. Escoffier, & B. McKelvey, "The Wisdom of Crowds in the Movie Industry: Towards New Solutions to Reduce Uncertainties". *International Journal of Arts Management*, 17(2), 52-63, 2015, pp. 85-86.
- [40] J. Elster, "Racionalidad, moralidad y acción colectiva". En F. Aguilar, *Intereses individuales y acción colectiva*

- (pp. 43- 69). Madrid: Pablo Iglesias, 1991.
- [41] R. Tuomela, *The philosophy of sociality: The shared point of view*. New York: Oxford University Press, 2010.
- [42] L.E. Bohorquez, & J. Posada, *Design of a Model of Emerging Joint Actions in Human Social Systems based on the Interaction between Agents*. Paper presented at the Workshop on Engineering Applications WEA, Bogota D.C.-Colombia, 2015.
- [43] F. Aime, S. Humprey, S. Derue & P. Jeffrey, "The riddle of heterarchy: power transitions in cross-functional teams". *Academy of Management Journal*, 57(2), 2014, pp. 327-352.
- [44] P. S. Donal Crilly, "Autonomy or Control? Organizational Architecture and Corporate Attention to Stakeholders". *Organization Science*, 2013, pp. 1-17.
- [45] L. Tihanyi, S. Graffin & G. George, "Rethinking governance in management research". *Academy of Management Journal*, 1015(1), 2015, pp. 1-9.
- [46] A. Mandellini, *Self-Organization and new hierarchies in complex evolutionary value networks*. In Huotari & Livonen. (Ed) *Trust in knowledge management in system organization* (pp 248-300), 2004. DOI 10.4018/978-1-59140-126-1.ch010.
- [47] R. Passet, *Principios de bioeconomía*. Madrid: Fundación Argentaria, 1996.
- [48] R. Axelrod, *The complexity of cooperation: Agent-based models of competition and collaboration*. Princeton: Princeton University Press, 1997.
- [49] BBC Mundo (2016). *Como funcionan las empresas que se deshicieron de los gerentes* [En línea], recuperado el 2 de noviembre de 2015. Disponible en: http://www.bbc.com/mundo/noticias/2015/10/151016_empresas_sin_gerentes_autogestion_finde_dv.
- [50] S. Turnbull, *The governance of the firms controlled by more than one board: Theory development and examples (Ph.D thesis, Macquarie Graduate School of Management)*. Sydney, 2000.
- [51] J. Posada, *Diseño de una simulación basada en agentes para la auto-organización empresarial*. Tesis de maestría. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá, D.C., Colombia, 2016.
- [52] Siggelkow, N., & Levinthal, D. "Temporarily Divide to Conquer: Centralized, Decentralized, and Reintegrated Organizational Approaches to Exploration and Adaptation". *Organization Science*, 14(6), 2003, pp. 650-669.
- [53] H. Pagels, *Los sueños de la razón: El ordenador y los nuevos horizontes de las ciencias de la complejidad*. Barcelona: Gedisa S. A., 1991.
- [54] R. Cameron, & S. Sankaran, "Mixed methods research design: Well Beyond the Notion of Triangulation". En N. Drouin, R. Müller & S. Sankaran (Eds.). *Novel Approaches to Organizational Project Management Research* (pp. 383-401). Copenhagen: Copenhagen Business School Press DK., 2013.
- [55] N. Krivinska, T. Hacker, F. Xhafa & M. Alexander, "Flexible complexity management and engineering by innovative services". *Global Journal of Flexible Systems Management*, 15(1), 2014, pp. 1-3.
- [56] M. Besharov, "The relational ecology of identification: how organizational identification emergence when individuals hold divergent values". *Academy of Management Journal*, 57(5), 2014, pp. 1485-1512.
- [57] R. Canales, (2015). "Weaving Straw into Gold: Managing Organizational Tensions Between Standardization and Flexibility in Microfinance". *Organization Science*, 25(1), 2015, pp. 1-28.
- [58] A. Shipilov, R. Gulati, M. Kilduff, S. Li, W. Tsai, "Relational pluralism within and between organization". *Academy of Management Journal*, 1015(1), 2015, pp. 90-100.

Luz E Bohórquez Arévalo

Nació en Bogotá, D.C.- Colombia; ingeniera Industrial de la Universidad Católica de Colombia; magíster en Administración de Empresas, Universidad Externado de Colombia; doctorado en Ciencias de la Dirección en la Universidad Colegio Mayor de Nuestra Señora del Rosario; Profesora asociada en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas; investigador al grupo ComplexUD donde realiza estudios sobre organizaciones y complejidad.

Correo electrónico: lebohorqueza@udistrital.edu.co

Reporte de caso

Modelo de Encriptación Simétrica Basada en Atractores Caóticos

Symmetric Encryption Model Based on Chaotic Attractors

José Moreno¹, Fabio Parra¹, Rafael Huérfano¹, César Suárez¹, Isabel Amaya¹

¹Universidad Distrital Francisco José de Caldas – Facultad de Ingeniería.
Correo electrónico: iamaya@udistrital.edu.co

Recibido: 04-12-2015. Modificado: 15-05-2016. Aceptado: 28-07-2016

Resumen

Contexto: El aumento en la capacidad de procesamiento de las máquinas y los desarrollos en los algoritmos de búsqueda combinatoria disminuyen el tiempo necesario para descifrar fraudulentamente la información; por esta razón se plantea la necesidad de generar nuevas formas de codificar la información para su transmisión segura.

Método: En este artículo se presenta un modelo de encriptación simétrico extensible para comunicaciones digitales, aprovechando el caos generado por sistemas dinámicos no lineales.

Resultados: El modelo desarrollado demostró estar en la capacidad de encriptar mensajes en tiempos de sincronización, encriptación y desencriptación inferiores a 1 ms con una entropía superior a 6 usando el atractor de Rössler para su implementación.

Conclusiones: El algoritmo se presenta como una alternativa a los algoritmos tradicionales de combinatoria demostrando una mayor eficiencia en la gestión de recursos computacionales y plantea las bases para su continuar con su estudio en la comunidad académica interesada, debido a la variedad de los sistemas dinámicos no lineales.

Palabras clave: Atractores caóticos, caos, comunicaciones digitales, encriptación, seguridad, sincronización.

Idioma: Español



Citación: J. Moreno, F. Parra, R. Huérfano, C. Suárez, I. Amaya, "Modelo de Encriptación Simétrica Basada en Atractores Caóticos," INGENIERÍA, vol. 21, no. 3, pp. 378-390, 2016.

© Los autores; titular de derechos de reproducción Universidad Distrital Francisco José de Caldas. En línea DOI: <http://dx.doi.org/10.14483/udistrital.jour.reveng.2016.3.a08>

Abstract

Context: The increase in the processing capacity of machines and developments in combinatorial search algorithms reduces the time required to decipher the information fraudulently. Bear in mind this, there is a need to generate new ways of encoding information for secure transmission.

Method: In this paper a symmetrical and extensible model for digital communications encryption is presented, taking advantage of the chaos generated by nonlinear dynamic systems.

Results: The developed model proved to encrypt messages in time synchronization, encryption and decryption less than 1 ms with an entropy higher than 6 using the Rössler attractor for its implementation.

Conclusions: The algorithm is presented as an alternative to traditional algorithms demonstrating greater efficiency in the management of computing resources and raises the groundwork for continuing their study on the interested academic community due to the variety of dynamical systems nonlinear.

Keywords: Chaos, chaotic attractors, digital communications, encryption, security, synchronization.

1. Introducción

Los sistemas dinámicos estudian el comportamiento de fenómenos físicos en el tiempo, los cuales se modelan matemáticamente por medio de ecuaciones diferenciales o en diferencias finitas, según se trate de fenómenos de tipo continuo o discreto, respectivamente. El propósito es, antes que hallar la solución analítica, analizar el comportamiento del sistema a largo plazo y determinar si al realizar pequeños cambios en las condiciones iniciales del modelo, se generan cambios trascendentales con el paso del tiempo; en caso afirmativo, se trata de una situación en la que aparece el caos, que está ligado a fenómenos de tipo no lineal, en los cuales el comportamiento es impredecible a largo plazo. En el año 1963, el meteorólogo Edward Lorenz estudió el comportamiento de la atmósfera y quiso proponer un modelo matemático para realizar predicciones del clima, formuló lo que en la actualidad se conoce como ecuaciones de Lorenz, pero, curiosamente, por medio de simulaciones computacionales se dio cuenta de que, ante pequeñas perturbaciones de los datos iniciales, el sistema cambiaba su comportamiento, lo cual impedía hacer predicciones.

Por otra parte, la criptografía es una disciplina muy antigua y tiene como fin proteger información confidencial, ha sido utilizada desde su origen en entornos políticos, militares, religiosos, entre otros. El intercambio de información juega un papel trascendental en la actualidad y gracias al progreso de la tecnología existen prometedores resultados con respecto a la evolución y mejora de la seguridad en su transmisión. Según el número de claves utilizadas, los sistemas criptográficos se clasifican en simétricos y asimétricos, en los sistemas simétricos el emisor y el receptor utilizan la misma clave y en los sistemas asimétricos el emisor y el receptor utilizan claves distintas.

Los algoritmos convencionales de encriptación se basan en factorización de enteros y en el problema de logaritmo discreto, pero continuamente se están desarrollando nuevos algoritmos, como los basados en los principios de la mecánica cuántica, los algoritmos que implementan autómatas celulares y los que utilizan la teoría del caos.

Los autómatas celulares corresponden a modelos matemáticos idealizados de sistemas físicos en los cuales el espacio y el tiempo se consideran discretos y evolucionan mediante reglas de iteración de tipo local. Este principio es aprovechado para el enmascaramiento de información, un mensaje es enmarcado dentro de una vecindad y esta lo encripta a medida que evoluciona. En [1] se muestra una aplicación de autómatas celulares para la encriptación de datos médicos enviados a través de internet. El problema que presenta este método corresponde a la complejidad de las reglas utilizadas, ya que a mayor complejidad no es posible predecir el comportamiento futuro del sistema de encriptación; sin embargo, si las reglas no son lo suficientemente complejas el sistema de encriptación se vuelve vulnerable.

La criptografía cuántica fue propuesta en 1984 por Brenner y Brassard y está basada en el teorema de la no clonación de la mecánica cuántica. Aunque los sistemas de criptografía cuántica no son de fácil acceso por la construcción del ordenador cuántico, se advierte que estos serían una amenaza a los sistemas de criptografía convencional debido a que se podría factorizar a una velocidad superior a la de los ordenadores actuales [2].

Este artículo se centra en los algoritmos basados en caos, estos aparecieron en 1990 como una aplicación novedosa de los sistemas dinámicos no lineales y en las últimas décadas han tomado mucha fuerza en el diseño de algoritmos de encriptación [3]–[15], lo que ha generado una nueva línea de investigación denominada criptografía caótica.

El caos ha sido utilizado para diseñar comunicaciones seguras de forma análoga y digital, ya que existen propiedades similares, como por ejemplo, la sensibilidad de los sistemas caóticos a las condiciones iniciales se asemeja a la propiedad de difusión en los sistemas de criptografía. La baja sensibilidad a la clave secreta y la posibilidad latente de ataques basados en la estimación de los parámetros de encriptación son considerados los dos mayores problemas en casi todos los sistemas de comunicación análoga basados en caos, cuya seguridad se fundamenta en la teoría de sincronización de los atractores caóticos propuesta por Pecora y Carroll. [3], [4].

En [5] el autor describe las fortalezas que aportan los sistemas caóticos en términos de la seguridad de la información, aunque advierte que los algoritmos basados en caos que incluyen los principios de difusión y confusión, no se pueden comparar con los algoritmos criptográficos tradicionales, debido a que usualmente presentan debilidades en términos de seguridad y rapidez de convergencia. Además, hace analogías entre los fundamentos de los sistemas dinámicos y los de la criptografía; la interrelación básicamente la plantea bajo la premisa que los algoritmos de encriptación de bloques pueden ser reescritos como sistemas dinámicos en tiempo discreto, donde la condición inicial es el texto plano que se va a encriptar y el estado final es el texto encriptado.

Por otra parte, el autor resalta que los parámetros de la función caótica pueden representar la clave del algoritmo de encriptación, y que el sistema debe satisfacer la propiedad de mezcla la cual permite generar el principio de difusión, que significa esparcir un dígito del texto original en muchos dígitos del texto cifrado. También, señala que el futuro de la criptografía basada en caos depende de si la solución del problema es computacionalmente impredecible, es decir, que no pueda ser resuelto por máquinas de tiempo polinómico probabilístico.

En el año 1993 Kevin Cuomo y Alan Oppenheim, utilizaron la propiedad de sincronización para ocultar comunicaciones análogas implementando las ecuaciones de Lorenz en los circuitos electrónicos de emisión y recepción. Ellos propusieron dos estrategias para el encriptamiento de la información, la primera adicionando al mensaje el enmascaramiento caótico de la señal común en el emisor y luego restándolo en el receptor, la segunda consistió en utilizar la modulación de las señales caóticas para adicionar el mensaje en el circuito emisor y luego hacer la detección del error en el circuito receptor [6].

En 1996 en [7] los autores propusieron un método de sincronización robusta, basado en un sistema de realimentación, para esquemas de comunicación caótica. Este método permite que, en ausencia de ruido, múltiples señales en un solo canal logren una perfecta sincronización de los receptores con sus respectivos transmisores.

M.S. Azzaz, C. Tankougast, S. Sadoudi y Adandach, de la Universidad Paul Verlaine de Metz en Francia, realizaron la implementación de una llave aleatoria, para encriptar y desencriptar información, basada en el atractor caótico de Lorenz, sobre compuertas programables FPGA (Field Programming Gates Array), con lo cual lograron, según lo indican, una arquitectura de hardware compacta y con alta velocidad de desempeño. La arquitectura se diseñó con base en la solución numérica de las ecuaciones de Lorenz por el método Runge Kutta 4 [8].

En el año 2011, se realizó una tesis de maestría, en la Universidad Nacional de Colombia Sede Bogotá, alusiva al enmascaramiento de información mediante sistemas caóticos sincronizados, en la que se aplicó la propiedad de sincronismo de algunos sistemas caóticos para simular numéricamente el enmascaramiento de información, la transmisión y recuperación de ésta, utilizando la técnica de enmascaramiento Chaotic Shift Keying (CSK) con los modelos de Lorenz, Rössler y Sprott [9].

En [10], se propone un nuevo enfoque para la encriptación de imágenes en tiempo real utilizando dos funciones logísticas y empleando una clave de 80 bits, la llave secreta es dinámica y se cambia cada 16 pixeles. Aprovechando las propiedades caóticas de las funciones logísticas demuestran la alta sensibilidad de la clave secreta.

En [11] se presenta un algoritmo para encriptar texto plano por medio de la función logística, pero se genera un sistema de encriptación débil y lento ya que el mensaje es encriptado con el número entero de iteraciones realizadas por esta función.

En [12], se describe una aplicación de un algoritmo de encriptación caótico para cifrar plantillas de huella dactilar con base en la generación de sucesiones caóticas utilizando la función logística y un proceso de permutación y difusión para evitar el robo de identidad. La encriptación basada en caos ha demostrado ser mejor debido a las propiedades inherentes de ergodicidad, sensibilidad, parámetros de control, pseudo-aleatoriedad y mezcla, todos estos útiles para mejorar la seguridad de la transmisión de la información.

En [13] se propone un algoritmo de encriptación de imágenes utilizando la función lineal a trozos conocida en la literatura de los sistemas dinámicos como función tienda. El valor de los pixeles de

la imagen plana y la clave inicial son calculados mediante un algoritmo de cuantificación dando como resultado un valor decimal, el cual se utiliza como valor inicial de la función tienda. El algoritmo de cuantificación está basado en operaciones de multiplicación, por lo que pequeños cambios en la imagen plana generan una alta sensibilidad en los resultados de cuantificación. Con el decimal obtenido en el proceso de cuantificación se generan dos sucesiones ergódicas, usadas para el proceso de permutación, se aplica también difusión, en el cual los valores de los píxeles son modificados basados en la división y operación módulo utilizando ocho valores caóticos especiales. Los autores muestran que el método de encriptación es robusto y seguro, por lo tanto, es apropiado para utilizar como herramienta de cifrado de imágenes.

En [14] se desarrolla un modelo factible de encriptación caótico utilizando las propiedades que presentan tres funciones generadoras de caos, la función logística, la función de Pinchers y Sine-circle, los autores logran tiempos de encriptación por debajo de 1.5 milésimas de segundo, para desencriptar un tiempo inferior a 61.3 milésimas de segundo y una entropía superior a 7.4, que garantiza un alto nivel de eficiencia y seguridad.

En la literatura existen desarrollos de algoritmos de encriptación basados en caos utilizando un único sistema dinámico caótico, en este artículo se desarrolla un algoritmo de encriptación genérico, es decir, un algoritmo extensible a cualquier sistema caótico sincronizable como lo plantea Pecora & Carroll en [3]. Una vez sincronizados ambos subsistemas, cada mensaje se encripta superponiendo una de las componentes del atractor con la representación en ASCII del mensaje. Como caso de estudio, se implementó el algoritmo desarrollado con los sistemas caóticos de Lorenz y Rössler.

2. Marco Teórico

2.1. Generalidades de los sistemas dinámicos caóticos

Un sistema dinámico es una representación matemática de un sistema físico, que busca predecir su comportamiento a medida que transcurre el tiempo; la representación matemática involucra ecuaciones diferenciales o ecuaciones en diferencias finitas, según sea de tipo continuo o discreto respectivamente. Cuando no se satisface el principio de superposición se está ante la presencia de un sistema no lineal para lo cual se hace un estudio fundamentalmente de tipo cualitativo para caracterizar su dinámica en el tiempo, la no linealidad abre la posibilidad de que se genere caos.

En este artículo se entiende que el caos ocurre cuando el sistema presenta un comportamiento aperiódico a largo plazo, es decir, existen trayectorias que con el paso del tiempo no convergen a órbitas periódicas, cuasi periódicas, o puntos fijos y exhibe una dependencia sensible a pequeñas variaciones en las condiciones iniciales; lo que significa que dos trayectorias cercanas, a medida que transcurre el tiempo se separan de forma exponencial. Los sistemas dinámicos caóticos sincronizables son caracterizados por los exponentes de Lyapunov negativos, una entropía y complejidad algorítmica positiva, y tienen otras propiedades tales como mezcla y preservación de medida en las transformaciones [5].

Lorenz formuló un modelo tridimensional para realizar predicciones climatológicas y notó que, si el modelo se alimentaba de la observación anterior con cifras redondeadas, en lugar de las cifras reales, este se comportaba inicialmente de la misma forma, pero rápidamente comenzaban a trazarse trayectorias totalmente distintas a las seguidas cuando las cifras eran las reales, lo cual generaba predicciones erróneas en las condiciones climatológicas [15].

El modelo de Lorenz se describe en la ecuación 1.

$$\frac{dx}{dt} = a(y - x) \quad \frac{dy}{dt} = a(b - z) - y \quad \frac{dz}{dt} = xy - cx \quad (1)$$

Donde cada punto (x, y, z) representa un estado de la atmósfera y, a, b y c son parámetros. Para analizar su evolución se debe seguir un campo de vectores, dicho sistema presenta comportamiento caótico para varios valores de los parámetros y originó todo un desarrollo en la teoría de los sistemas dinámicos caóticos. La Figura 1, muestra una trayectoria descrita por el atractor de Lorenz.

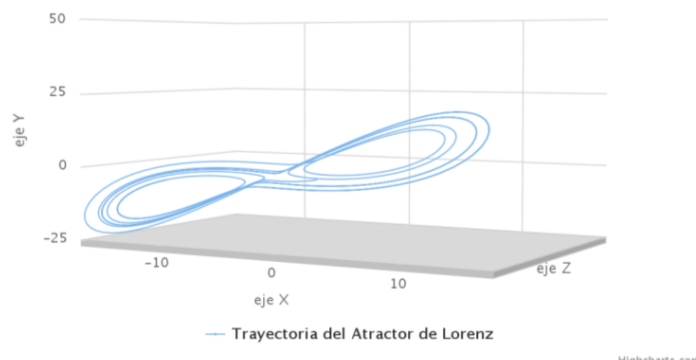


Figura 1. Atractor de Lorenz Fuente: elaboración propia usando la librería Highcharts.

2.2. Sincronización de sistemas dinámicos caóticos

La sincronización es el proceso en el que dos o más sistemas caóticos logran un comportamiento dinámico común después de un estado transitorio [5]. En 1989, Louis M. Pécora y Thomas L. Carroll, descubrieron el sincronismo que se puede presentar en atractores caóticos, descomponiendo los sistemas en por lo menos dos subsistemas y encadenándolos con señales comunes; si los exponentes de Lyapunov de los subsistemas son todos negativos, ellos demostraron que los subsistemas se sincronizarán, es decir, la trayectoria de un subsistema convergerá hacia la del otro, a medida que el tiempo transcurre [3].

La sincronización de sistemas se ha utilizado para encriptar información, gracias a la impredecibilidad en el comportamiento de los sistemas caóticos. Para realizar la sincronización se requieren dos sistemas, uno llamado maestro, que es el sistema caótico original, y el otro denominado esclavo, el cual se construye de subsistemas obtenidos a partir del sistema original y seleccionando la variable que se desee como enlace, llamada variable sincronizante o conductora. La Figura 2

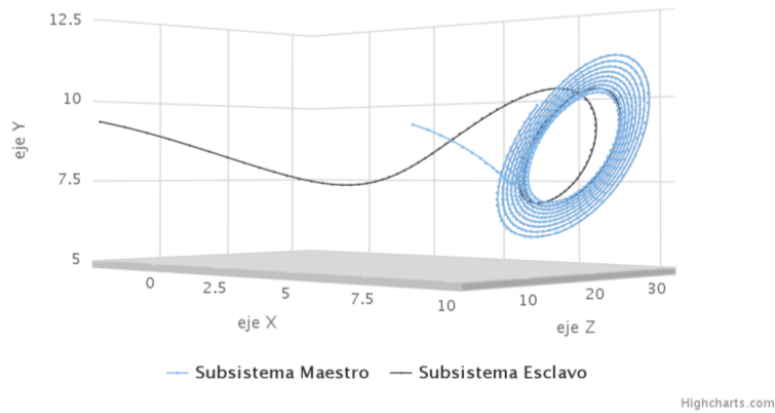


Figura 2. Sincronización en el Atractor de Lorenz Fuente: elaboración propia usando la librería Highcharts.

muestra el proceso de sincronización, siendo la trayectoria del subsistema esclavo la línea negra y la del maestro la línea azul.

Particularmente, en el caso del atractor de Lorenz, Pécora formuló 3 formas de dividir el sistema de acuerdo con la componente x , y o z que se escoja como maestra y las dos restantes como esclavos respectivamente. Por cada una de estas posibles divisiones se debe calcular los subexponentes de Lyapunov como se muestra en la Tabla I. El sistema de Lorenz presenta exponentes de Lyapunov negativos, como lo cal-

culó Pécora & Carroll, cuando la componente x o y se seleccionan como maestros.

Tabla I. Exponentes de Lyapunov en el Atractor de Lorenz

| Maestro | Esclavo | Exponentes de Lyapunov |
|---------|---------|------------------------|
| x | (y,z) | $(-1.81,-1.86)$ |
| y | (x,z) | $(-2.67,-9.99)$ |
| z | (x,y) | $(0.0108,-11.01)$ |

3. Algoritmo de encriptación propuesto

En el esquema de encriptación desarrollado se toma un sistema caótico y se divide en dos subsistemas autónomos llamados maestro y esclavo. El subsistema maestro es asignado al emisor y el esclavo al receptor. Tanto el emisor como el receptor inicializaran sus sistemas caóticos en condiciones iniciales diferentes. Posteriormente, el maestro envía la componente conductora hacia el receptor hasta que los dos subsistemas estén sincronizados. Una vez sincronizados los dos subsistemas, se representa el mensaje en ASCII y se suma cada carácter con una de las componentes del atractor obtenidas en una unidad de tiempo t_i . La unidad de tiempo va aumentando a medida que se codifica cada carácter. Finalmente, se convierte el mensaje encriptado utilizando la tabla ASCII y se envía al receptor.

El receptor toma el mensaje, lo representa en ASCII y resta cada dígito con una de las componentes del atractor obtenidas en la misma unidad de tiempo t_i . La unidad de tiempo va aumentando a medida que se decodifica cada carácter. El mensaje desencriptado se convierte a caracteres utili-



Figura 3. Proceso de Enmascaramiento de mensaje

zando la tabla ASCII. En la Figura 3, se esquematiza el proceso anterior, los cuadrados amarillos representan el mensaje en código ASCII y se muestra la superposición del caos con el mensaje.

Se deben tener presentes las siguientes consideraciones:

- Se pueden generar las condiciones iniciales de forma aleatoria, pero si los valores se alejan demasiado de la región ocupada por el atractor, el proceso de sincronización tomará más tiempo.
- La convergencia de la sincronización será más rápida entre más pequeña sea la unidad de tiempo y menor la cantidad de dígitos decimales utilizados para la aproximación.
- En caso de obtener valores negativos durante el proceso de encriptación, se debe tomar el valor absoluto de estos y sumarlo al valor en ASCII con el fin de evitar números negativos en el mensaje encriptado.
- Los dígitos del mensaje encriptado no pueden ser superiores a 255.
- Se deben tomar unidades de tiempo grandes con el fin de generar la mayor entropía posible durante el proceso de encriptación, el cual se inicia una vez los atractores estén sincronizados.

Con el fin de ilustrar el algoritmo de encriptación desarrollado, se toma como caso de estudio el atractor de Lorenz con los parámetros $a = 10$, $c = 8/3$ y $b = 20$. A continuación, se describen las fases de desarrollo:

1. Se divide el sistema en dos subsistemas maestro – esclavo, en este caso se utilizó como maestro debido a que sus exponentes de Lyapunov son los más negativos, recordando que entre más negativos sean los exponentes de Lyapunov, más rápida será la convergencia.
2. Se inicializan los subsistemas con condiciones iniciales aleatorias que estén cercanas a la región del atractor.
3. Se sincronizan los atractores enviando la componente maestra hacia el esclavo. Se generan los 700 primeros valores del atractor maestro Utilizando Runge Kutta 4 con un salto $h = 0,01$ (centésimas de segundo) y se envían los resultados de la componente como clave pública K hacia el atractor esclavo. Este proceso se representa en la ecuación 2.

$$K = y_0y_1y_2 \dots y_{700} \quad (2)$$

Siendo y_i el número obtenido en la iteración , en el instante de tiempo t_i definido como se muestra en 3

$$t_i = \begin{cases} t_{i-1} + h, & t > 0 \\ 0, & t = 0 \end{cases} \quad (3)$$

4. Se determina la longitud del mensaje, que corresponde al número n de caracteres que éste posee. Por ejemplo, el mensaje “Hola” tiene cuatro caracteres, por lo tanto $n = 4$.
5. Como se muestra en la ecuación 4, se convierte cada dígito del mensaje m en su representación numérica según la tabla ASCII.

$$m = [m_0, m_1, m_2, \dots, m_{n-1}] \quad (4)$$

Tomando el ejemplo anterior, el mensaje “Hola” representado en ASCII corresponde a $m = [72, 111, 108, 97]$

6. Se calcula la salida del atractor para n iteraciones. Utilizando Runge Kutta 4 con un salto $h = 0,1$ (décimas de segundo) se generan n valores del atractor representados como se muestra en 5.

$$e = [e_0, e_1, e_2, \dots, e_{n-1}] \quad (5)$$

Donde e_i corresponde a la salida del atractor en valor absoluto, aproximada a un dígito y multiplicada por 10. En un instante de tiempo t_j definido en 6

$$t_j = \begin{cases} t_{j-1} + h, & j > 0 \\ t_i, & j = 0 \end{cases} \quad (6)$$

7. Se debe actualizar t_i a t_j , debido a que cada vez que se codifica un mensaje, existe un corrimiento de $n * h$ unidades de tiempo, con el fin de no perder la sincronía entre los subsistemas maestro y esclavo.
8. Se suma cada salida del vector e con los caracteres del mensaje m representados en la tabla ASCII, para superponer el mensaje con el caos generado por el atractor obteniendo el mensaje encriptado m_e , como se muestra en 7.

$$m_e = [e_0 + m_0, e_1 + m_1, e_2 + m_2, \dots, e_{n-1} + m_{n-1}] \quad (7)$$

9. Se convierte el mensaje codificado m_e en caracteres ASCII.

Para el proceso de desencriptación se generan los valores obtenidos desde el emisor en el receptor tomando el mismo instante t_j , como la longitud del mensaje encriptado es la misma que la del mensaje original, basta con repetir los pasos 4, 5, 6 y 7 en el sistema esclavo. Finalmente, el mensaje desencriptado m_d se calcula utilizando la fórmula mostrada en 8.

$$m_d = [m_0 - e_0, m_1 - e_1, m_2 - e_2, \dots, m_{n-1} - e_{n-1}] \quad (8)$$

Aunque el algoritmo de encriptación descrito anteriormente utiliza el atractor de Lorenz, conviene precisar que este algoritmo puede extenderse reemplazando el sistema de Lorenz por otro sistema dinámico caótico que cumpla las condiciones descritas anteriormente; particularmente en la sección 4 se ejemplifica con el atractor de Rössler.

4. Implementación del algoritmo

Con el propósito de mostrar la validez y viabilidad del algoritmo propuesto, se realizaron pruebas cifrando un texto utilizando los atractores de Rössler y Lorenz en el lenguaje de programación JavaScript 1.8.

La tabla II muestra el resumen del proceso de encriptación y desencriptación para un mensaje específico usando el atractor de Lorenz como caso de prueba para el algoritmo desarrollado. Debido a que las condiciones iniciales son aleatorias en cada ejecución y al desplazamiento en el tiempo cada vez que se codifica un mensaje, se genera una codificación diferente para un mismo mensaje en instantes de tiempo diferente. Si se hace una segunda ejecución, con el mismo atractor y el mismo mensaje se genera una nueva codificación.

Tabla II. Prueba de encriptación y desencriptación usando el atractor de Lorenz

| | |
|---|---|
| Mensaje a encriptar | La revista Ingeniería es una publicación periódica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. |
| Mensaje encriptado usando el atractor de Lorenz | g ;?jÈR0V±-Èe.À ±%¿%ÀÈRÛOa0T00IÈÈC-C. s-0. «°RJqçl==->skqB\$§j#-c»- %µ¿I¿i°0UaD0`i0iC0 |
| Segunda ejecución con el atractor de Lorenz |]°y.«-¹\$h¹³³%¹·Àè¶vXÈxIè³xÈÏ.ÀX·³¹t»k0-¹0k¹#E] Z XX~È«WX"j #!È±idc"0f`0j1»·ÀGjÀE%.¶0v¿ÈÈÈzÈµAs0°%0 ¹%-¶f²µI¹ÈE]1-g |
| Mensaje desencriptado | La revista Ingeniería es una publicación periódica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. |

En la tabla III, se muestra el mismo texto, pero encriptándolo mediante el atractor de Rössler, siguiendo el algoritmo propuesto.

Tabla III. Prueba de encriptación y desencriptación usando el atractor de Rössler

| | |
|--|--|
| Mensaje a encriptar | La revista Ingeniería es una publicación periódica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. |
| Mensaje encriptado usando el atractor de Rössler | d·vÈ»I¿ÈÈ·vÀ%»À¿»ÈÑ·v»ÈvÈÀ·vÀÈ.À¿¹·²:hÀv»Èz:h0¿¹·v0»v À·v·¹ÈÀÈ·0v0»vÀ%»À¿»ÈÑ·v0»vÀ·v»À¿I»ÈÈ¿0·0v¿ÈÈCÈÈ¶ÀUC¶ À.ÀÈ.ÀuÀÈIu¹0uGjÀ¹ÈÈ |
| Segunda ejecución con el atractor de Rössler |]¶Uç°ÈXÈÈµtÀ»¹À%¹Ætµt¹CtÉÀµtÀÈ¶GjÀ%·µ·%0AsÀ.ÀX0·%¶ s·.s¿¹s¹GjCÈÈ¶¶r0·rÀ¹·À»·ÀL²qm¶q%²q¿¿C¶GjÀÀ0± p¹ÀÀÀ¹À±%0A%².À²%0%Àkn²³n¹0±0A{ |
| Mensaje desencriptado | La revista Ingeniería es una publicación periódica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. |

En todos los casos se desencriptó el mensaje sin ningún tipo de inconveniente y con tiempos buenos de ejecución, como se evidencia en el análisis de seguridad.

5. Análisis de seguridad

Para analizar el desempeño del algoritmo propuesto se midió el tiempo de sincronización, el tiempo de encriptación, el tiempo de desencriptación y la entropía para diez ejecuciones del algoritmo

y posteriormente se calculó el promedio de estos, ya que los tiempos de ejecución varían debido a la naturaleza de los sistemas dinámicos no lineales y las condiciones iniciales aleatorias en cada ejecución. Estas pruebas fueron realizadas en una máquina con 8 GB de memoria RAM y un procesador Intel® Core(TM) i5-4210U CPU @ 1.70HGz 2.40 GHz. A continuación, se describen las métricas utilizadas para evaluar el desempeño del algoritmo sobre los atractores de Rössler y Lorenz:

- El tiempo de sincronización corresponde al tiempo requerido para que la trayectoria del atractor esclavo se sincronice con la del maestro. Este tiempo comienza a medirse después de la generación de la clave pública y su recepción por parte del emisor.
- El tiempo de encriptación se cuenta a partir del instante en que finaliza la sincronización, se mide desde el momento que se recibe el mensaje hasta que este se encripta.
- El tiempo de desencriptación se mide desde el momento en que se recibe el mensaje encriptado hasta que este se desencripta.

Finalmente, para la medición de la entropía se utilizó la fórmula de Shannon mostrada en la ecuación 9.

$$E = - \sum_{i=0}^N p(i) * \log_2(p(i)) \tag{9}$$

Donde p_i denota la probabilidad de obtener el caracter i del mensaje codificado y N la longitud del mensaje. A medida que el valor de la entropía aumente, mayor va a ser la fiabilidad del método de encriptación.

En la Tabla IV se sintetizan los resultados de las métricas tomadas sobre los atractores extraños. Se evidencia que los tiempos de sincronización, encriptación y desencriptación están por debajo de 1 milisegundo (ms), presentando un mejor desempeño para el atractor de Lorenz, sin embargo la entropía tiene un mejor desempeño con el atractor de Rössler.

Tabla IV. Métricas para los atractores de Rössler y Lorenz

| Métrica | Atractor de Rössler | Atractor de Lorenz |
|---|---------------------|--------------------|
| Tiempo de sincronización promedio (ms) | 0.7192 | 0.084 |
| Tiempo de encriptación promedio (ms) | 0.3161 | 0.2322 |
| Tiempo de desencriptación promedio (ms) | 0.4744 | 0.3539 |
| Entropía promedio | 6.2251 | 5.8550 |

5.1. Análisis de sensibilidad

Debido a la propiedad de alta sensibilidad que tienen los sistemas caóticos y la imposibilidad de sincronización cuando no se envían los resultados de las trayectorias del atractor maestro, un solo cambio en la clave pública K impediría la sincronización del sistema esclavo y su posterior desencriptación del mensaje. En la Figura 4 se muestra un intento fallido de desencriptación al sumar 0.1 a la salida del atractor de Lorenz en K_{700} .

```
Mb!r!fxn}_+?l!gcjaUR`<S$!yv13|FVinq{!Æ>) CjđÄï;mqđ
±;l!b2AA6X}wn`WeÄMÿ·J (<&w@,¼{C8s°mmiF*Pç
¥4EV5e.BRfø<GWJATr_
```

Figura 4. Intento Fallido de Descriptación.

6. Conclusiones

Se logró formular un algoritmo eficiente de encriptación basado en atractores caóticos. Aunque solo se utilizaron los atractores de Lorenz y Rössler, se pueden emplear otros atractores caóticos que cumplan con las condiciones descritas en este documento, los cuales podrían aumentar la variabilidad y por ende la seguridad del algoritmo, hecho que debe motivar a la comunidad académica interesada en el tema a seguir explorando la interacción entre el caos y la seguridad.

Se destaca que, en el proceso de sincronización y encriptación, se cambian los valores de h con el fin de obtener un equilibrio entre tiempo de sincronización y entropía del mensaje a encriptar. Se recomienda usar valores de h pequeños al momento de la sincronización, ya que valores muy grandes generan una llave más grande y valores más grandes para la encriptación y descriptación, con el fin de generar mayor entropía.

En este artículo se utilizó una sola componente del atractor caótico para realizar la encriptación, pero en el futuro se podría pensar en usar todas las componentes del atractor en instantes de tiempo diferentes con el fin de aumentar la entropía del mensaje encriptado. Además, se recomienda proteger la clave pública para evitar la sincronización de otro sistema intruso esclavo, lo cual se puede lograr aprovechando un sistema de encriptación asimétrico.

Con la implementación del algoritmo propuesto y basados en los resultados de las métricas obtenidas se logró evidenciar un tiempo bastante corto en el proceso de encriptación, descriptación y sincronización, además de un valor de entropía alto, por lo cual se puede recomendar como un método viable y seguro de cifrado. Según los resultados obtenidos se aconseja usar el atractor de Rössler, ya que a pesar de que sus tiempos de ejecución son mayores que los de Lorenz, son infinitesimales en ambos casos, mientras que su entropía es mayor, lo que garantiza un mejor nivel de seguridad.

Con los resultados de las métricas tomadas, se evidencia que el algoritmo desarrollado tiene un buen desempeño en términos de tiempo inferiores a 1 ms, al ser comparado con el propuesto en [14], se muestra que existe una mejora en términos de tiempo de ejecución, aunque, cabe recalcar que los autores no especifican las características del recurso utilizado para la ejecución de tales pruebas, ni la cantidad de pruebas realizadas.

Referencias

- [1] P. Anghelescu, S. Ionita and E. Sofron, "Block Encryption Using Hybrid Additive Cellular Automata". *7th International Conference on Hybrid Intelligent Systems (HIS 2007)*, Kaiserlautern, 2007, pp. 132-137.
- [2] R. S. Vignesh, S. Sudharssun and K. J. J. Kumar, "Limitations of Quantum & the Versatility of Classical Cryptography: A Comparative Study". *Environmental and Computer Science*, 2009. ICECS '09. Second International

- Conference on, Dubai, 2009, pp. 333-337.
- [3] Louis M. Pecora y Thomas L. Carroll, "Synchronization in chaotic systems". *Physical Review Letters*, Volumen 64, Número 8, Febrero 1990, pp. 821- 824.
- [4] Li S., Alvarez G., Li Z. y Halang W. A., 2007. *Analogue chaos-based secure communications and cryptanalysis: a brief survey*. *PhysCon*.
- [5] L. Kocarev, "Chaos-based cryptography: A brief overview". *IEEE Circuits and Systems Magazine*, 2001, 1(2): 6-21.
- [6] K. M. Cuomo, A. V. Oppenheim, y Steven H. Strogatz, "Synchronization of Lorenz-Based Chaotic Circuits with Applications to Communications". *IEEE transactions on circuits and systems-II: analog and digital signal processing*, Volumen 40, Número 10, Octubre 1993, pp. 626-633.
- [7] V. Milanovic and M.E. Zaghoul, "Improved masking algorithm for chaotic Communication systems". *Electronic Letters*, 1996, 32(1): 11-12.
- [8] M. S. Azzaz, C. Tanougast, et al., "Real-time FPGA implementation of Lorenz's chaotic generator for ciphering telecommunications". *IEEE North-East Workshop on Circuits and Systems and TAISA Conference*, 2009, pp. 1-4.
- [9] Camilo A. Ramírez, "Enmascaramiento de Información Mediante Sistemas Caóticos Sincronizados", Tesis de magister, Departamento de matemáticas, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá D.C., Colombia, 2011.
- [10] N.K. Pareek, Vinod Patidar y K.K. Sud. "Image encryption using chaotic logistic map". *Image and Vision Computing*, 2006, 24(9): 926-934.
- [11] M.S. Baptista, "Cryptography with chaos". *Physics Letters A*. Vol 240, 1998, pp 50-54.
- [12] Murillo-Escobar M.A. y Cruz-Hernández C. "Cifrado caótico de plantilla de huella dactilar en sistemas biométricos". *Congreso Latinoamericano de Control Automático*, 2014, 18-23.
- [13] Yuling Luo, Lvchen Cao, Senhui Qiu, Hui Lin, Jim Harkin y Junxiu Liu, "A chaotic map-control-based and the plain image-related cryptosystem". 2016. *Nonlinear Dynamics*. Volume 83, Issue 4, pp 2293-2310.
- [14] A. Akgül, S. Kaçar, B. Aricioğlu and İ Pehlivan, "Text encryption by using one-dimensional chaos generators and nonlinear equations". *Electrical and Electronics Engineering (ELECO)*, 2013 8th International Conference on, Bursa, 2013, pp. 320-323.
- [15] Steven H. Strogatz, *Nonlinear Dynamics and Chaos with Applications to Physics, Biology, Chemistry, and Engineering*. Perseus Books, Reading, Estados Unidos, 1994, pp. 301-347.

César Augusto Suárez Parra

Ingeniero Mecánico e Industrial, Universidad INCCA de Colombia; magíster en Materiales y procesos de fabricación, Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá; actualmente se desempeña como docente en la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Correo electrónico: casuarezp@udistrital.edu.co

Edilma Isabel Amaya Barrera

Licenciada en Matemáticas, Universidad Distrital Francisco José de Caldas; magíster en Matemáticas, Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá; actualmente se desempeña como docente en la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Correo electrónico: iamaya@udistrital.edu.co

Rafael Esteban Huérfano Ortiz

Estudiante de Ingeniería de Sistemas, Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Correo electrónico: rehuerfano@correo.udistrital.edu.co

José David Moreno Posada

Ingeniero de Sistemas, Universidad Distrital FJC. Correo electrónico: jdmorenop@correo.udistrital.edu.co

Fabio Andrés Parra Fuentes

Estudiante de Ingeniería de Sistemas, Universidad Distrital FJC. Correo electrónico: faparraf@correo.udistrital.edu.co

Estudio de Caso

Modelación Integrada de Sistemas Socio-ecológicos Complejos: Caso de Estudio la Ecorregión de la Mojana

Integrated Modeling of Complex Socio-ecological Systems: Case Study of the Mojana ecoregion

Paula Andrea Villegas González¹, Nathaly Triviño Leon¹, Jorge Alberto Escobar Vargas¹, Nelson Obregón Neira¹, Mauricio González Méndez², Ramón Eduardo González Salazar¹, María Juliana Flórez Flórez¹

¹Pontificia Universidad Javeriana. , ²Universidad Católica de Colombia.
Correo electrónico: pvillegas@javeriana.edu.co

Recibido: 20-11-2015. Modificado: 03-04-2016. Aceptado: 15-05-2016

Resumen

Contexto: Se ha observado que la modelación de sistemas socio-ecológicos complejos a partir de simulaciones basadas en agentes, tienen la ventaja de integrar diferentes procesos, escalas, variables y la posibilidad de generar escenarios con actores en el marco de procesos de modelación participativa.

Método: Se diseñó una herramienta computacional para la planificación y apoyo a los procesos de toma de decisión relacionados con la gestión de los recursos hídricos, específicamente para el caso de las inundaciones en la ecorregión de la Mojana (Colombia). Son desarrollados talleres de participación social relacionados con creencias, valores, redes sociales y resiliencia.

Resultados: El modelo tiene dos componentes: el primero representa la hidrodinámica de las inundaciones por medio de la plataforma numérica ISIS 2D; el segundo, en relación con los aspectos sociales de la región, se maneja a través de modelado de sistemas de agentes. Ambos sistemas están integrados en la plataforma NetLogo.

Conclusiones: La modelación integrada de sistemas socio-ecológicos complejos permite visualizar el comportamiento de la población y los recursos naturales en un territorio, contribuyendo al diseño de políticas y los procesos educativos con la participación de diferentes disciplinas y actores. Trabajos futuros, pueden enfocarse en la modelación regional y el análisis del impacto producido por el uso de estas herramientas.

Palabras clave: Modelación participativa, modelos basados en agentes, sistemas socio-ecológicos.

Agradecimientos: A las comunidades de los municipios de Nechí (Departamento de Antioquia-Colombia) y San Marcos (Departamento de Sucre-Colombia) por su participación en la investigación. A los grupos de investigación de Riesgo en sistemas naturales y antrópicos, de la Pontificia Universidad Javeriana y Gestión y tecnología para la sustentabilidad de las comunidades, de la Universidad Católica de Colombia.



Citación: P.A. Villegas, N. Triviño, J.A. Escobar, N. Obregón, M. González, R.E. González, M. Flórez, "Modelación Integrada de Sistemas Socio-ecológicos Complejos: Caso de Estudio la Ecorregión de la Mojana," INGENIERÍA, vol. 21, no. 3, pp. 391-410, 2016. © Los autores; titular de derechos de reproducción Universidad Distrital Francisco José de Caldas. En línea DOI: <http://dx.doi.org/10.14483/udistrital.jour.reveng.2016.3.a09>

Abstract

Context: It was observed that the modeling of complex socio-ecological systems based on Agent-Based Simulations has the advantage of allowing the integration of different processes, scales, variables and the possibility to generate scenarios with actors in the context of the modeling with stakeholders.

Method: A computational tool for planning and support of decision-making processes related with water resources management, specifically in the case of floods in the Mojana ecoregion (Colombia) is designed along with social participation workshops related with beliefs, values, social networks and resilience.

Results: The model has two components: the first one represents the hydrodynamic of flooding by means of the numerical platform ISIS 2D. The second one, regarding the social aspects of the region, is handled via agent systems modeling. Both schemes are integrated into the NetLogo platform.

Conclusions: The integrated modeling of complex socio-ecological systems allow us to visualize the behavior of the population and the natural resources in a territory, contributing to the design of policies and educational processes involving different disciplines and actors. Future work will focus on regional modeling and the analysis of the impact produced by the use of these tools.

Keywords: Agent-based modeling, modeling with stakeholders, socio-ecological system.

Acknowledgment: Municipalities communities of Nechí (Antioquia-Colombia) and San Marcos (Sucre-Colombia) for their participation in the research. Researchers: Pontificia Universidad Javeriana's risk in natural and human systems group and Universidad Católica de Colombia's Management and technology for communal sustainability group.

1. Introducción

Durante los últimos años ha aumentado el uso de modelos caracterizados por la integración de múltiples métodos de modelación y tecnologías que hacen parte de varias disciplinas [1]. Dicho proceso ha surgido por la necesidad de representar la complejidad de los sistemas ecológicos, que para esta investigación considera elementos sociales y ambientales del territorio la Mojana.

La Mojana es una ecorregión de especial importancia para Colombia, que hace parte del complejo de humedales de la Depresión Momposina, la cual es una cuenca hidrográfica sedimentaria de 24.650 km² reguladora de los caudales de los ríos Magdalena, Cauca y San Jorge. Tales humedales cumplen la función de amortiguación de inundaciones, facilitando la decantación y acumulación de sedimentos, funciones de control indispensables para la costa Caribe [2]. El ecosistema está siendo afectado por desequilibrios ambientales generados por el inadecuado uso, ocupación del territorio y por el inapropiado manejo de las cuencas de los ríos que allí confluyen; adicionalmente, la construcción de obras civiles ha generado daños en el equilibrio del complejo cenagoso y fluvial. En los últimos años la infraestructura se ha orientado al control del agua mediante obras que afectan la dinámica hídrica y desestabilizan los sistemas hidrobiológicos, en lugar de adaptarse a las condiciones del medio natural y social para su aprovechamiento. Las dinámicas ambientales y sociales, en conjunto, están generando peligros para la sostenibilidad de los valiosos ecosistemas naturales que la caracterizan y limitando el desarrollo socio-económico de la población allí asentada. A lo anterior se suma que es problemático que los procesos de toma de decisiones en algunas ocasiones se hacen desconociendo los diversos saberes y conocimientos locales de los habitantes, lo cual se

agrava más aún cuando dichas decisiones se toman desde el gobierno centralizado que desconoce las dinámicas regionales. En este sentido, la investigación tiene como propósito representar este territorio como un sistema socio-ecológico complejo desde la ingeniería, vinculando elementos sociales y a través de la modelación basada en agentes.

Los ecosistemas son sistemas complejos [3], en los que patrones a niveles superiores surgen de interacciones y procesos generados en los niveles inferiores [4]. Las características clave de este tipo de sistemas son la no linealidad [3], la emergencia, la auto organización y su carácter impredecible [5]. Además, el concepto de escala, donde para cada nivel de resolución en el que el sistema es observado, se puede generar un modelo diferente para describir las características en esa escala [6]. Deben ser estudiados como un sistema compuesto de múltiples componentes que interactúan, cuyo comportamiento da lugar a funciones y estructuras agregadas [4]. La modelación integrada de sistemas complejos que propone esta investigación pretende apoyar los procesos de toma de decisión a escala local. Esto en el sentido que tiene la capacidad de representar mejor las dinámicas del sistema, explorar futuros posibles considerando diferentes escenarios [1] y es susceptible de entablar un diálogo que tome en cuenta los conocimientos locales de las comunidades.

En el análisis y modelación de sistemas ecológicos se han utilizado diferentes técnicas, con aproximaciones fundamentadas en las matemáticas, la física, la ecología o las ciencias sociales. Para el caso de la ecorregión de la Mojana, en 1977 la Misión Colombo Holandesa propone obras de infraestructura para la limpieza y adecuación de canales; en 1998 Corpoica (Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria) realiza una caracterización biofísica de la producción agropecuaria [30]; en el 2003 es propuesto un programa de desarrollo sostenible de la región de la Mojana que define un plan productivo, agropecuario y forestal [2]; en el 2006 con el Conpes 3421 el DNP (Departamento Nacional de Planeación) son definidas las estrategias para la reactivación económica y social de la Mojana; en el año 2011 es formulado el Plan de Ordenamiento Ambiental y Desarrollo Territorial propone una modelación matemática hidráulica y de calidad de agua. Actualmente, el Fondo de Adaptación realiza estudios para la intervención integral en la reducción del riesgo de inundación [32]. Como se observa, todas estas iniciativas acuden a diferentes ámbitos de saber; sin embargo, en ninguna de ellas la participación de las comunidades locales ha jugado un rol protagónico. Esta última característica ha generado que decisiones, por ejemplo, en inversión de infraestructura, no se hayan podido concluir por la resistencia de las comunidades. Esta investigación, desde un enfoque interdisciplinar y orientada por el diálogo de saberes, busca lograr una modelación integrada teniendo en cuenta que la multidimensionalidad de los problemas exige ir más allá de la disciplina de la ingeniería hidráulica. Por ejemplo, de la física (dado que el agua es uno de los componentes estructurales del territorio) o de las ciencias sociales (para considerar las dinámicas sociales y comunitarias como otros determinantes de las dinámicas territoriales).

Remolina (2014) [45] entiende la interdisciplinariedad “como el paso de la multiplicidad de las disciplinas a su integración en un pensamiento complejo” y él enfatiza en tres niveles. El primero, la uni-disciplinariedad y multidisciplinariedad que consiste en el estudio de un mismo objeto por varias disciplinas. El segundo, Inter-disciplinariedad que implica la transferencia de métodos de una disciplina a otra. El tercero, la trans-disciplinariedad que se basa en la existencia de diversos niveles de realidad, entre los cuales se da discontinuidad, con saltos cualitativos entre uno y otro nivel. De esta manera, “la interdisciplinariedad busca restituirle a la realidad su integridad recons-

truyéndola en su complejidad por medio de la integración de los conocimientos”. Pero, advierte, no todo es integrable inmediatamente dado que la complejidad de la realidad es orgánica y en un organismo cada dimensión o componente tiene funciones y conectores diferentes.

En el proceso interdisciplinar que se quiere abordar en esta investigación, las diversas disciplinas han de integrarse de manera orgánica y gradual. Aquí se dan los primeros pasos para pasar del primer nivel de interdisciplinariedad al segundo, pues se asume que no es suficiente el abordaje del territorio desde la Ingeniería hidráulica, sino que debe empezar a contemplar aportes de las ciencias sociales para entrar en diálogo con los conocimientos locales. En esta línea, es pertinente el énfasis de Amozurrutia (2011) [45] en dos señalamientos que son fundamentales para esta investigación: primero, que “es necesario hacer un trabajo interdisciplinario que permita enfrentar lo complejo de nuestra realidad social en la multidimensionalidad de sus problemas”; esta complejidad se ve reflejada en las características de la ecorregión; segundo que es crucial promover “una forma de investigación cimentada en lenguajes comunes, como la epistemología y las matemáticas, y potenciada por un pensamiento sistémico que use recursos computacionales como plataforma generativa de conocimiento”. En este caso, el proceso de investigación apunta a la construcción de lenguajes comunes, un pensamiento sistémico para la solución de problemas y el diseño recursos computacionales como herramientas para la simulación.

Varias publicaciones se han destacado en este tema, los primeros trabajos en modelación de uso de la tierra y cambio en la cobertura vegetal son presentados por Parker (2012) [7], y se llegó a la conclusión de que ha sido una de las principales aproximaciones para representar la complejidad, encontrando las propiedades emergentes definidas como “un resultado macroscópico como resultado de las sinergias e interdependencias entre los componentes del sistema inferior” [7]. Bousquet and Le Page (2004) [8], hacen una revisión de las simulaciones multi- agentes (MAS) para la gestión de los ecosistemas, donde se concluye que esta técnica de modelación es útil para los problemas de integración de los aspectos sociales y espaciales. Matthews et al., (2007) [9] presentan una revisión relacionada con la manera de incorporar la toma de decisiones sobre el uso del suelo a través de la modelación. Para esto tienen en cuenta modelos basados en agentes de (i) análisis de políticas y planificación, (ii) modelos participativos, (iii) Explicación de patrones espaciales del uso de la tierra, entre otros. Concluyen que la modelación basada en agentes, tiene la ventaja de incorporar procesos sociales y enlazar dinámicamente estos procesos y los ambientales. An (2012) [10] hace una revisión sobre los sistemas humanos y naturales acoplados, a la luz de la teoría de la complejidad y sus aplicaciones, donde resalta la importancia de generar protocolos o arquitecturas genéricas, que puedan servir como puntos de referencia, que incluyen recomendaciones sobre la estructura de los modelos, la elección de los mismos y los elementos claves en el modelado de las decisiones humanas.

Diferentes temas de aplicaciones ambientales han sido investigados en: Balbi *et al.*, (2013) [11] donde se representan los efectos del cambio climático. Brown et al., (2004) [12] donde se realizan modelos de desarrollo residencial en la periferia rural-urbana. Barreteau and Bousquet (2000) [13] acerca de la viabilidad de los sistemas de riego y la influencia de las redes sociales. Schreinmachers and Berger (2011) [14], para la toma de decisiones en procesos de explotación agrícola. Balbi *et al.*, (2015) [15] sobre los servicios ecosistémicos relacionados con los rendimientos del cultivo, suministro de agua y la calidad, el clima y la calidad del aire. Anselme *et al.*, (2010) [16], sobre

biodiversidad y conservación, donde se construyó una representación compartida del territorio y desarrollaron escenarios de gestión alternativos con actores locales.

Por todo lo expresado con anterioridad, se puede concluir que la modelación de sistemas socio-ecológicos complejos a partir de simulaciones basadas en agentes, tiene la ventaja de poder integrar diferentes procesos, escalas, variables y la posibilidad de generar escenarios con actores en el marco de procesos de modelación participativa. Esto se convierte en una potencialidad para los procesos interdisciplinarios de planeación e intervención en un territorio. Se han encontrado tres retos en la aplicación de la simulación basadas en agentes que se esperan abordar en esta investigación, sin expresar que ya están resueltos: (i) modelación de la conducta de los agentes. (ii) análisis de sensibilidad, verificación y validación y el (iii) acoplamiento de modelos socio-demográficos, ecológicos y biofísicos [41].

En este artículo son presentados algunos avances conceptuales, metodológicos y resultados del modelado apoyado en agentes en el municipio de Nechí (Departamento de Antioquia-Colombia), que permiten soportar los procesos de toma de decisión.

2. Materiales y métodos

2.1. El diseño y la modelación en ingeniería

Esta investigación es abordada desde el marco conceptual del diseño en ingeniería, con un componente social y de participación que generalmente no son abordados desde la ingeniería clásica. Según Kroes (2012) [17], el diseño “es un proceso de invención, una generación inteligente y evaluación de especificaciones de nuevos objetos, artefactos; cuya forma y función logren los objetivos establecidos y satisfagan las necesidades, pero también contemplan limitaciones y restricciones”.

El diseño tiene una actividad mental y una actividad física. Respecto al aspecto mental “El verdadero trabajo de fabricación se realiza bajo la guía de un modelo, de acuerdo con el cual se construye el objeto. Dicho modelo puede ser una imagen contemplada por la mente o bien un boceto en el que la imagen tenga ya un intento de materialización mediante el trabajo” [18].

El modelo conceptual utilizado en esta investigación es presentado en la Figura 1. Allí se observa que el componente principal es el territorio concebido como “espacio construido por los grupos sociales a través del tiempo, a la medida y a la manera de sus tradiciones, pensamientos, sueños y necesidades, territorios que significan mucho más que espacio físico poblado por distintas formas de vida que se relacionan, cooperan y compiten entre sí; lo que permite concebir al territorio como un campo relacional” [21]. El cual está compuesto por los niveles del agua, los usos del suelo, la población y las relaciones entre estos. Estos tres componentes y los procesos de modelación participativa constituyen el artefacto para el modelado integrado de sistemas socio-ecológicos complejos.

La modelación participativa pretende incorporar elementos del ecosistema y a la población conformada por grupos de seres humanos. Que no solo se encuentran representados o imaginados en la herramienta de simulación, sino también en el proceso de diseño, construcción e implementación del modelo. Para modelar las dinámicas sociales, el uso de reglas que representan la conducta de los

agentes es un reto y los conceptos de la propuesta socioeconómica inspirada en la teoría evolutiva pueden ser utilizados [47]. De tal manera que puedan integrarse los flujos de relación entre diferen-

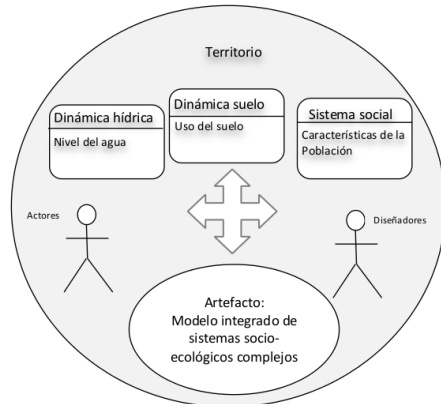


Figura 1. Modelo conceptual utilizado para este estudio. Los rectángulos representan los submodelos que integran el artefacto, un modelo integrado de sistemas híbridos complejos.

tes submodelos. Todas las entidades, agentes y recursos asociados pueden ser concebidos como portadores de reglas y estas reglas pueden tener una trayectoria que pasa por el origen, adopción y retención. Pero además son analizadas utilizando los niveles micro, meso y macro que tienen relación directa con la trayectoria de la regla. En este sentido, se pretenden incluir reglas a diferentes niveles, micro, meso y macro, en el marco la herramienta de simulación. De tal manera que se puedan generar eventos hipotéticos, comúnmente denominados escenarios [48]. El artefacto es una herramienta para explorar futuros y posibles estrategias para implementar en un territorio, producto de un trabajo interdisciplinar con la participación de las comunidades locales.

Según Epstein (2008) [19] “Cualquiera que se aventure a proyectar, o imaginar una dinámica” está ejecutando un modelo. Los modelos pueden ser predictivos o explicativos (Epstein, 2008). Además de predecir pueden ser utilizados para explicar, descubrir nuevas preguntas y educar al público en general. El propósito del modelo presentado responde a ¿cómo se integran los resultados de modelación hídrica con elementos sociales, que permita contribuir al entendimiento de las dinámicas del territorio y la generación de escenarios? Adicionalmente, los modelos pueden clasificarse como implícitos o explícitos [19]. El modelo presentado es implícito, dado que los supuestos están ocultos, su consistencia no se ha probado, sus consecuencias lógicas y su relación a los datos es desconocida. Se busca el diseño de un modelo formal que según Schwaninger (2010) [20], tiene entre sus características, la generación de modelos de simulación donde se pueden llevar a cabo experimentos con el fin de obtener el conocimiento en el sistema real estudiado.

2.2. Modelación integrada

Desde diferentes saberes, disciplinas y específicamente la ingeniería existen diversas alternativas para entender dinámicas en un territorio. Los modelos físicos (hidrológico, hidráulico, hidrodinámico, de agua subterránea, etc.) se utilizan para predecir el estado espacial y temporal de los recursos hídricos [22]. Los modelos demográficos pueden simular aspectos socioeconómicos, como proyecciones de la demanda del sector social, pronóstico de población por edad y nivel educativo, entre otros [23]. Los modelos de gestión pueden ser concebidos para ayudar a las organizaciones a completar sus tareas con eficacia [24]. Sin embargo, implementar alguno de estos podría no ser suficiente para representar las dinámicas en el territorio. Por lo tanto, en este estudio se requiere explorar el diseño de un modelo, que como afirman Letcher *et al.*, (2013) [25] permita tener una comprensión integrada de los procesos donde se tengan en cuenta los componentes físicos y sociales, sus interacciones complejas, cómo responden a diferentes cambios, además del conocimiento

y opinión de las partes interesadas.

El enfoque se plantea integrado en la medida que la región de la Mojana es abordada como un territorio, un sistema complejo [17], donde están involucrados: objetos, naturaleza, artefactos técnicos, actores humanos, entidades sociales, normas y leyes. Son presentados fundamentos de la modelación integrada según Letcher *et al.*, (2013) [25] con las ideas que han surgido en la investigación:

- El enfoque integrado surge porque la gestión de los recursos naturales tiene impactos en otros aspectos como: sociales, económicos, ambientales y de infraestructura. La integración es parte de un enfoque sistémico, donde aparecen varias dimensiones y dinámicas del territorio como un todo.
- La modelación integrada es un proceso donde también aparecen integrados los actores a través de procesos de modelación participativa. Estos pretenden: (i) incrementar el conocimiento de los actores, (ii) lograr el entendimiento de un sistema y sus dinámicas bajo varias condiciones como aprendizaje colaborativo e (iii) identificar y clarificar los impactos de situaciones dadas soportando la toma de decisiones [26]. Resulta necesario contar con la integración y conocimiento de los actores en las diferentes etapas de modelación, no solo para empoderarlos de la herramienta o usarla sino también para generar un proceso legitimación. La integración de disciplinas o saberes también se contempla en los procesos de modelación integrada. El objetivo es lograr transformar esta información en conocimiento al interior del modelo y tener en cuenta el conocimiento de dichos expertos.
- La integración de escalas. Los componentes de un sistema pueden operar a diferentes escalas espaciales y temporales. Para examinar aspectos de hidrología los límites de las cuencas pueden ser los más apropiados, sin embargo, cuando se consideran aspectos sociales y económicos, estas escalas pueden variar a hogares, granjas, instituciones grupos sociales, o entidades. La selección de la escala tiene en cuenta (i) la escala de interés para los usuarios o actores interesados, (ii) la escala a la que los procesos pueden ser representados, (iii) el vínculo entre los componentes del modelo que representan los procesos en diferentes escalas y (iv) las limitaciones prácticas tales como datos, capacidad computacional, cubrimiento de la población en términos de conocimiento experto. En la Tabla I se presenta un ejemplo, donde se puede observar un análisis de escalas temporales y espaciales para la ecorregión de la Mojana.
- La integración de procesos resulta importante, en la medida que se deben combinar dos o más procesos en el territorio que responden a los componentes a modelar. La modelación puede llegar a requerir la combinación de técnicas de modelación de diferentes disciplinas.

2.3. Descripción del modelo

En los últimos años se ha avanzado en el desarrollo de herramientas computacionales para la planificación y apoyo a los procesos de toma de decisión en la gestión del recurso hídrico. Los modelos integrados han sido fundamentales en la captura de la complejidad de los usos del agua [28].

Tabla I. Análisis de las escalas en el territorio: ecorregión de la Mojana

| Elementos que integran el sistema que se quiere modelar | | |
|---|---|---|
| Inundación | Población | Usos de suelo |
| El análisis espacial: se pueden observar y analizar las manchas de inundación en la cuenca Magdalena Cauca, o en el núcleo de la región de la Mojana, dada por la variación de los niveles del agua. También se puede observar la variación de los niveles del río o de la ciénaga. | El análisis espacial: los satisfactores de las necesidades básicas de los seres humanos pueden cambiar. Por ejemplo: para la necesidad de subsistencia. Los satisfactores correspondiente a la alimentación, el trabajo y la salud durante el periodo de inundación pueden cambiar [27]. Esto podría analizarse desde la perspectiva de la persona, de las personas que conforman el barrio, las familias, de los barrios que conforman el municipio, de una comunidad afín como por ejemplo de mujeres cabeza de familia, entre otras. | El análisis espacial: en la parcela, en la vivienda, en el municipio, en el departamento, en el núcleo de la región de la Mojana, las características y el uso del suelo puede cambiar. Obras de infraestructura pueden construirse, pueden dañarse, pueden estar en periodos de mantenimiento. Estas pueden ser en una vía, en una sección del río, etc. |
| El análisis temporal: mensual, anual, horario, diario. | El análisis temporal: una vida (nacimiento-muerte), una etapa de la vida (niñez, juventud), los procesos políticos (un periodo de gobierno), escalas demográficas, adolescencia. Una hora, un día, un mes, un año. | El análisis temporal: duración de la cosecha, duración de siembra, tiempo de vida útil de la obra de infraestructura. Una hora, un día, un mes, un año. |

En este sentido es necesario, para el caso de la ecorregión de la Mojana, contar con modelos que permitan simular grupos autónomos como asentamientos poblacionales o individuos y sus interacciones entre sí y con el territorio. Por tal motivo se ha seleccionado la técnica de simulación basada en agentes, dado que tiene la capacidad de acoplar los procesos de inundación, con el territorio y las dinámicas sociales. A continuación, se describen algunos aspectos para la construcción e implementación del modelo integrado con el soporte conceptual de los trabajos de Letcher *et al.*, (2013) [25] y Refsgaard *et al.*, (2007) [29]. Primero se hace una descripción de la zona de estudio y luego es presentada la arquitectura del modelo.

2.3.1. Descripción de la zona de estudio

La ecorregión de la Mojana está ubicada entre la región Andina y las llanuras del Caribe, esta es de gran importancia ya que hace parte de la subregión fisiográfica conocida como Depresión Momposina, la cual está limitada por el río Cauca al oriente, el río San Jorge al occidente, el Brazo de Loba del río Magdalena al norte y las estribaciones de las Serranías de Ayapel y San Lucas al sur [30].

Los primeros pobladores fueron los indígenas Zenues, quienes colonizaron y adecuaron la depresión Momposina e iniciaron su poblamiento desde el siglo IX a.C, hasta los siglos X-XII d.C [49]. En este proceso de poblamiento aparecen ingenieros hidráulicos tradicionales muy importantes que marcaron la historia del manejo de los recursos hídricos en Colombia y en Latinoamérica. Con el fin de adaptarse a los periodos de inundación construyeron plataformas artificiales (de entre 2 o 3 m de altura) para instaurar sus viviendas sin que los niveles del agua las afectara. Este sistema estaba compuesto por canales artificiales y camellones (partes elevadas entre canal y canal) que cumplían la doble función de encausar el agua hacía el mar y servir de lugar de cultivo. Las aguas se distribuían de manera uniforme, circulaban más lentamente durante la época de inundaciones y, en época de sequía, permanecían humedeciendo los camellones [49]. Dichas técnicas fueron abandonadas y las causas no han sido establecidas. Aunque, este abandono se le atribuye a fenómenos ambientales (periodos de sequías), muy probablemente fue producto de la ola de colonización española y sus efectos de supresión cultural y epistémica, en este caso, de los avanzados conocimientos hidráulicos.

cos del momento. En todo caso, uno de las características especiales del proceso de poblamiento español que empezó en el siglo XVI fue la introducción de ganado en la zona por parte de los hermanos Heredia. De esta forma se instaló en el territorio la ganadería y explotación agrícola extensiva. Los hechos del proceso de colonización marcaron una nueva historia para la región. Las actividades económicas, ya no vistas como procesos de subsistencia de sus habitantes empiezan a enfocarse en la sobreexplotación del suelo, el agua y los seres humanos.

Actualmente, en épocas de invierno la región tiende a inundarse en casi toda su extensión y es por esta razón que el gobierno colombiano, a fin de controlar estos desastres construye a partir del CONPES 3421 de 2006 (Consejo Nacional de Política Económica y Social-Colombia) obras de infraestructura como compuertas, canales de drenaje y riego, estructuras de control hidráulico y algunos terraplenes o diques, para evitar desastres a gran escala. Entre ellas se encuentra un dique marginal multipropósito [31], que se encuentra localizado desde Colorado (Antioquia) hasta Achí (Bolívar) por todo el margen izquierdo del río Cauca. Este dique, durante el fenómeno de la niña de los años 2010-2011 presentó gran cantidad de fallas en las zonas más débiles (Nuevo Mundo, Pedro Ignacio y Santa Anita, Figura 2), debido al aumento de la creciete del río Cauca, generando inundaciones en una gran parte de la región. Entre los municipios más afectados se encuentra Nechí, con una población de 23.502 habitantes, en un territorio de 914 Km² (censo en Colombia del año 2011). Este territorio cuenta con una gran riqueza hídrica, ecológica y agropecuaria, pero debido a su localización está expuesto a frecuentes inundaciones. Esta situación ocasiona que el municipio no tenga un satisfactorio desarrollo económico, además causa enfermedades que afectan principalmente a niños y adultos mayores [31]. Según el DANE (Departamento Administrativo Nacional de Estadística), las Necesidades Básicas Insatisfechas alcanzan el 68.13 % (2011), el Índice de Desempeño Integral 44.99 % (DNP, 2013), y el GINI de tierras 0.627 (UniAndes, IGAC y U de Antioquia, 2012). Dichas características hacen evidente la dependencia que tiene la población de los ríos desde el punto de vista económico y social. Por lo que resulta importante analizar el comportamiento de las dinámicas entre el uso del suelo, la población y el recurso hídrico. Los resultados del ejercicio de modelación podrían generar herramientas en el marco de la gestión de los recursos naturales en el municipio, además de fortalecer los procesos de planeación. Esto contribuiría a los procesos del manejo integral de la Cuenca.



Figura 2. Localización del Municipio de Nechí (Antioquia) y zonas del dique Marginal que han presentado fallas: Santa Anita, Pedro Ignacio y Nuevo Mundo. Imagen obtenida de Google Earth.



Figura 3. Trabajo con las comunidades en la ecorregión de la Mojana. Significado del agua para la Población.

2.3.2. Trabajo con las comunidades

Esta idea de investigación surge entre los años 2011-2012, en el marco del trabajo con las comunidades locales de la Mojana emprendido como parte del equipo encargado de la formulación del Plan de Ordenamiento Ambiental y Desarrollo Territorial bajo el acuerdo con los once alcaldes municipales (autoridades locales) y con el fin de formular líneas estratégicas para varios temas, entre los más determinantes, el del manejo del recurso hídrico.

Posteriormente entre 2013 y 2015, se llevaron a cabo dos visitas a la Mojana, específicamente en los municipios de San Marcos y Nechí. En San Marcos se desarrollaron tres talleres con las instituciones educativas. El primero sobre creencias y valores y cuyo objetivo fue elaborar un diagnóstico participativo para profundizar sobre los metarelatos religiosos, las creencias populares, costumbres y valores de la población (Figura 3). El segundo, un taller de redes sociales e identidad cuyo propósito fue evaluar desde la experiencia comunitaria, elementos que ayudaran a esbozar características de la identidad local y regional, así como a vislumbrar los sueños compartidos. Por último, en el tercer taller sobre resiliencia tuvo como objetivo reconocer las cualidades y fortalezas que permiten a las personas enfrentar positivamente situaciones desfavorables. El objetivo de estos tres ejercicios tanto en San Marcos como en Nechí fue explorar los sentidos del agua, las experiencias con construcciones palafíticas en las escuelas, pero además identificar variables que debían ser incluidas en el modelo. Para el desarrollo de los talleres se acudieron a variadas técnicas de investigación de corte cualitativo; se hicieron cartografías sociales con niños y jóvenes, conversatorios comunitarios con profesores y padres y madres de familia. Además, se realizaron recorridos territoriales durante los cuales se mantuvieron conversaciones informales con los pobladores. De esta manera surge un acuerdo para iniciar un proceso de formación comunitaria en modelación que permita fortalecer los procesos de toma de decisiones en los municipios. La pertinencia de esta formación se justifica en graves hechos precedentes. Por ejemplo, en el caso del municipio de Nechí se perdió un programa de construcción de viviendas, dado que no se conocían con claridad los niveles que podría alcanzar el agua en la zona en periodos de inundación, por lo que la comunidad considera que comprender la relación entre las dinámicas hídricas y elementos sociales puede apoyar el conocimiento del territorio y la posterior toma de decisiones. Como resultado de estos ejercicios se identificó conjuntamente con la población local, una serie de variables iniciales que apoyaron la construcción del modelo presentado en esta investigación. Una vez la herramienta sea implementada se hará un ejercicio adicional de formación y validación con las comunidades locales, que además le otorgue sentido y legitimación al proceso de modo que pueda ser apropiado por la población.

2.3.3. Arquitectura del modelo

En esta sección se presenta con detalle los elementos del modelo y la metodología para generar el proceso de modelación integrada en la ecorregión de la Mojana. En la Figura 4 se presenta la estructura del modelo. La capa superior es el modelo de agentes que representa los habitantes, la del medio corresponde a las características de uso del suelo y la inferior describe el proceso de inundación. El suelo se pretende modelar como un autómata celular [32] cuyas celdas albergan una cantidad de la riqueza de la unidad territorial, medida no solo en términos de recursos naturales, sino también en elementos humanos como infraestructura y servicios, entre otros. Tiene capacidad

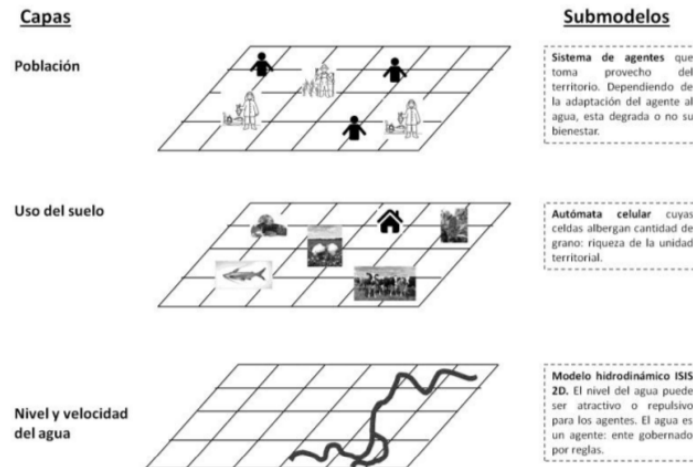


Figura 4. Componentes del modelo integrado [32]. Las capas propuestas están inspiradas por Berger *et al.*, (2006) [28], mientras que los sub-modelos toman como base a los aplicativos: NetLogo wealth distribution model (Wilensky, 1998, 1999) [34], NetLogo Urban Suite-Sprawl Effect model (Felsen and Wilensky, 2007; Wilensky, 1999) [35] y NetLogo Erosion model (Dunham *et al.*, 2004; Wilensky, 1999) [36].

de regeneración por lo tanto la cantidad de riqueza que se consume puede ser recuperada en el tiempo [32]. Los autómatas celulares son reconocidos como modelos computacionales sencillos, cuyo espacio es un arreglo de celdas donde agentes y reglas evolucionan en el tiempo. Estos son usados para modelar la complejidad de la naturaleza [52] y en este caso la evolución de la riqueza en el suelo.

Las poblaciones humanas (La capa de población) están representadas por un sistema de agentes que toman provecho del suelo para mejorar sus ingresos, sin embargo, la no adaptación a las condiciones de inundación puede degradarla. La interacción de los agentes con el suelo conlleva al mejoramiento o empobrecimiento del mismo. Con los niveles del agua (la capa nivel y velocidad del agua) arrojados por un modelo hidrodinámico (plataforma ISIS 2D), se simula una inundación que se produce periódicamente [33]. El nivel de agua en las unidades territoriales puede ser atractivo o repulsivo para los agentes (dependiendo de su nivel de adaptación en zonas con inundación y secas). La presencia periódica de la inundación, la capacidad de regeneración y modificación del territorio, sumadas a la posibilidad de cambio en los agentes hacen que el territorio se caracterice por exhibir un entorno variante en el tiempo [32].

• Modelación hidrodinámica:

Para la modelación hidrodinámica se utilizó la plataforma ISIS 2D [37]. En este caso se propone usar en la modelación del proceso de inundación de los ríos Cauca y Nechí. Esta herramienta permite conocer las condiciones hidrodinámicas del cuerpo de agua como: velocidad y elevación del nivel del agua. Las suposiciones utilizadas son: (i) el fluido es homogéneo, (ii) las velocidades verticales son mucho menores que las horizontales, (iii) las aceleraciones verticales pueden des-

preciarse, (iv) la distribución de presiones es hidrostática y (v) las fuerzas inerciales son mayores que las viscosas. Teniendo en cuenta las suposiciones presentadas, el software resuelve las ecuaciones de aguas someras por medio del método de diferencias finitas en el espacio y los métodos numéricos utilizados para la discretización temporal son: ADI, TVD, FAST y FAST Dynamic [37].

Estas se derivan de las ecuaciones de Navier-Stokes para flujo incompresible. El sistema de ecuaciones consta de las ecuaciones de movimiento horizontal y la ecuación de continuidad. El conjunto de ecuaciones diferenciales parciales en combinación con condiciones iniciales y de frontera se resuelven en una cuadrícula de diferencias finitas. En la Figura 5 se observa el esquema utilizado para la formulación de las ecuaciones de aguas someras que resuelve ISIS 2D.

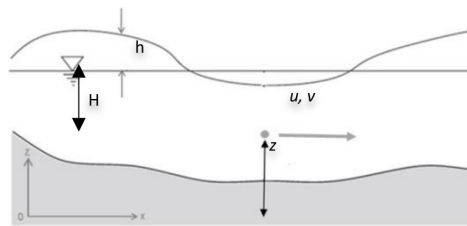


Figura 5. Representación de las ecuaciones de aguas someras. Wirasaet *et al.*, (2014) [38].

Donde H es la profundidad promedio del agua, h la perturbación de la superficie libre y u, v las velocidades horizontales, g la gravedad, S_x y S_y representan los términos fuente (fricción, viento coriolis, etc). A continuación, se muestra la forma general de las ecuaciones de aguas someras. La ecuaciones (1)(2) representan las ecuaciones de momento en las direcciones x y y . La ecuación (3) representa la conservación de masa [39].

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + z(u, v) = -g \frac{\partial h}{\partial x} + S_x \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + z(u, v) = -g \frac{\partial h}{\partial y} + S_y \quad (2)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial u}{\partial x}(H + h) + \frac{\partial v}{\partial y}[(H + h)v] = 0 \quad (3)$$

Para la selección de las condiciones iniciales y de frontera se hizo una encuesta con las comunidades que se ubican en las orillas del río y en los lugares donde se han generado rompimientos de obras de infraestructura. Allí se indaga sobre los niveles que alcanza el agua en diferentes épocas del año, la relación del agua con las actividades diarias y los impactos que se producen durante los periodos de inundación.

• **Modelación de la población:**

Se consideran dos tipos de agentes que representan el comportamiento de la población en la Mojana: agrícolas y anfibios que a su vez pueden adoptar dos estados: buscadores y asentados. Los atributos de los agentes se resumen en la Tabla II. Al comienzo el sistema inicializa el número total de agentes (agrícolas y anfibios); para cada uno de los cuales las rutinas son las mismas por población (i.e. buscar, moverse, asentarse, reproducirse y morir). La principal diferencia entre los dos tipos de agentes consiste en que el proceso de asentarse depende de la condición del suelo (i.e. seco o inundado). Las rutinas están predefinidas en función de la riqueza de las parcelas, no

obstante su incremento y estabilidad dependen adicionalmente de la velocidad de búsqueda (i.e speed) y de la riqueza acumulada.

Tabla II. Atributos de la población en el modelo [32].

| Atributo | Descripción |
|------------------|---|
| Age | Edad del agente |
| Wealth | Cantidad de riqueza que un agente tiene |
| Lfe-expectancy | Máxima edad que un agente puede llegar a tener |
| Metabolism | Cantidad de riqueza que un agente puede llegar a consumir |
| Stay-counter | Tiempo de establecimiento de un agente en una parcela |
| Patience-counter | Tiempo de búsqueda de un agente |
| Speed | Velocidad del agente |

Asimismo, estas últimas dan lugar a la configuración de tres clases sociales alta, media y baja (i.e. High, Medium, Low). Cuando el tiempo

de búsqueda de un agente se agota, este puede cambiar su condición de anfibio a agrícola o viceversa [32]. El agotamiento es función de presiones selectivas del ambiente sobre el agente. Con estas condiciones se calcula el coeficiente de GINI que representa la desigualdad en el territorio; pero además se puede analizar el nivel de vulnerabilidad (en el marco de la gestión del riesgo) de la población frente al fenómeno de la inundación.

• Modelo con sistemas de agentes:

Los agentes son un sistema autónomo y proactivo capaz de interactuar con otros agentes para satisfacer sus objetivos. Entre las características principales de los agentes se encuentra que son: autónomos, proactivos, situados y dirigidos por entidades de software [40]. En el marco de la modelación integrada, los sistemas de agentes permiten la simulación de los muchos futuros posibles emergentes de sistemas complejos, son herramientas de apoyo para la toma de decisión y ofrecen a los gestores de recursos naturales con la capacidad de comprender mejor la dinámica actual de su sistema [1]. En la Tabla III son presentadas posibles variables y reglas a usar a futuro en el modelo de agentes para el municipio de Nechí. La participación de los actores durante el proceso de modelación ha resultado fundamental, de tal manera que (i) se logra comprender el funcionamiento de la herramienta, (ii) los actores pueden contribuir a la generación de variables y reglas (ii) la herramienta puede ser ajustada según la visión de los actores y se logra la (iii) generación de esce-

Tabla III. Posibles variables del modelo
Elementos que integran el sistema que se quiere modelar

| Dinámica Hídrica | Sistema Social | Dinámica del suelo |
|---|--|--|
| <p>Variabes:</p> <p>Mancha de inundación (nivel del agua y extensión superficial)(m).</p> <p>Velocidad (m/s).</p> <p>Parámetros (Van Oel, P. <i>et al.</i>, 2010) [42]</p> <ul style="list-style-type: none"> ◊ Precipitación (mm). ◊ Evaporación (mm/día). ◊ Número de días de lluvia durante un t determinado. <p>Datos del sistema hídrico:</p> <ul style="list-style-type: none"> ◊ Vertimientos (m^3/s). ◊ Depósitos y relaciones superficie-Volumen (m^2/m^3). ◊ Modelo de elevación digital m. ◊ Coeficientes de escorrentía. | <p>Variabes para los agentes (Schreinemachers y Berger, 2011) [14]:</p> <ul style="list-style-type: none"> ◊ Ubicación de la vivienda. ◊ Ubicación de los cultivos. ◊ Composición de los hogares (edad, género y empleo). ◊ Recursos disponibles (dinero en efectivo, animales, huerta, arboles, equipos para la agricultura). ◊ La pertenencia a un grupo social. ◊ La pertenencia a un grupo de innovación (agentes con similares comportamientos en cuanto a prácticas de innovación). ◊ Características de los agentes: origen étnico, la educación, tamaño de la familia, y los ingresos (Sun y Muller, 2013) [43]. <p>Reglas de los agentes:</p> <ul style="list-style-type: none"> ◊ Las preferencias para cultivar. ◊ Las preferencias para asentarse o para buscar. ◊ Las preferencias por las cantidades de precipitaciones mm. ◊ Las preferencias de cultivo dadas las cantidades de precipitación y fuentes de agua disponible para el riego [42]. ◊ Área para regar hectáreas de cultivos [42]. | <p>Variabes para las unidades de territorio, patches [14]:</p> <p>Unidad de tierra: depende de nutrientes del suelo, materia orgánica, pendiente, longitud y la ubicación en el sistema hídrico.</p> <p>Tipos de suelo: representa grupos de píxeles con fertilidades de suelo similares.</p> <p>Características de los cultivos:</p> <ul style="list-style-type: none"> ◊ Duración de periodos vegetativos (Días). ◊ Profundidad de la raíz inicial (mm). ◊ Profundidad de la raíz final (mm). <p>Las características del suelo:</p> <ul style="list-style-type: none"> ◊ Profundidad del suelo (mm). ◊ Tasa de infiltración diario (mm). ◊ Total de agua disponible (mm/m). ◊ Si en la parcela hay alguna implementación de una política [43]. |

narios. Además, se considera como parte fundamental del proceso de modelación participativa el rediseño de la herramienta y retroalimentación continua. De manera paralela el equipo de modelación realiza un ejercicio de análisis del funcionamiento de la herramienta y planteamiento de escenarios.

3. Resultados

En esta sección son presentados los principales avances de la modelación integrada. En la Figura 6 se muestra el comportamiento de los niveles del agua en el municipio de Nechí. Estos permiten representar la mancha de inundación y a su vez se convierten en el principal insumo para el modelo integrado de agentes. El Modelo Digital de Elevación usado es el de la NASA [44], que tiene una resolución de 30×30 m. Los lugares por donde ha fallado el dique y la entrada del agua al pueblo son las condiciones de contorno y se usan los datos del nivel del agua (Nuevo Mundo: 3 m, Pedro Ignacio: 1,5 – 2 m, Santa Anita: 1,5 – 2 m y muralla: 0,5 – 1 m). Estos puntos y niveles de agua fueron tomados a partir de una visita de campo. Adicionalmente para los límites no predefinidos como condición de contorno en el área activa, el programa impone una condición de no flujo. La condición inicial es seca, es decir que en todo el dominio no hay agua. Es elegida una rugosidad de 0,03 en el número de Manning. Respecto a los parámetros numéricos, se determinó un tamaño de paso de tiempo $\Delta t = 2s$, con el cual se garantiza un CFL no mayor a 1.5, lo cual garantiza la estabilidad del modelo numérico y evita la presencia de oscilaciones indeseadas. El tiempo de simulación es de 24 horas con el fin de observar la mancha de inundación.

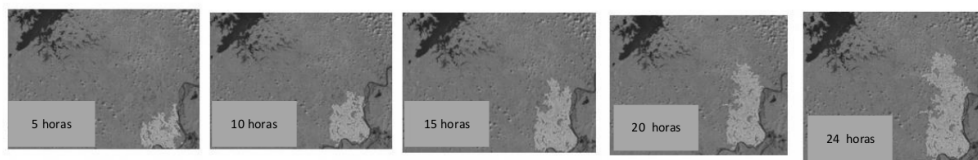


Figura 6. Modelación hidrodinámica. Niveles del agua-Mancha de inundación.

A partir de estos resultados, se observa cómo el flujo se propaga hacia la margen derecha del río y empieza su tránsito al interior de la ecorregión de la Mojana. Lo que afecta principalmente la población asentada en el área aferente al río Cauca. En la Figura 7 se observa la variación de la superficie libre del agua, en los puntos que ha fallado el dique. Estos niveles representan la dinámica del río que varía entre 31-36 m, evidenciando la amenaza por inundación. Este tipo de información es útil para: (i) la generación de un sistema de alertas tempranas, (ii) ubicación de asentamientos y el (iii) manejo de actividades productivas, entre otras.

La modelación de agentes tiene como propósito generar interacciones entre la población, la mancha de inundación y el uso del suelo. De esta manera se pretende analizar: (i) la relación de los niveles de inundación con el cambio en el sector productivo de la población, (ii) el análisis de zonas de riesgo debido a los procesos de amenaza por inundación y (iii) el análisis de vulnerabilidad territorial de la población frente a riesgos naturales, teniendo en cuenta aspectos sociales y económicos. A partir de estos aspectos, resulta importante generar escenarios de intervención,

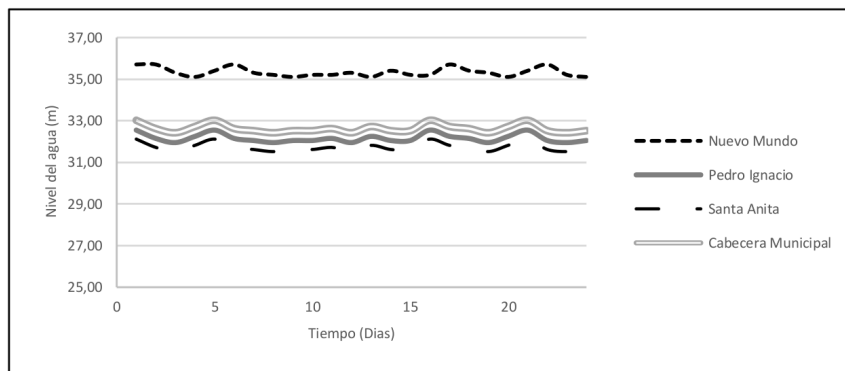


Figura 7. Variación de la superficie libre del agua.

que permitan apoyar los procesos de toma de decisiones en el municipio. La modelación integrada logró visualizar el comportamiento de la población y los recursos naturales en un territorio, lo que sin duda puede contribuir al diseño de políticas y la educación de la comunidad. En la Figura 8 es presentada una primera aproximación a la modelación con agentes.

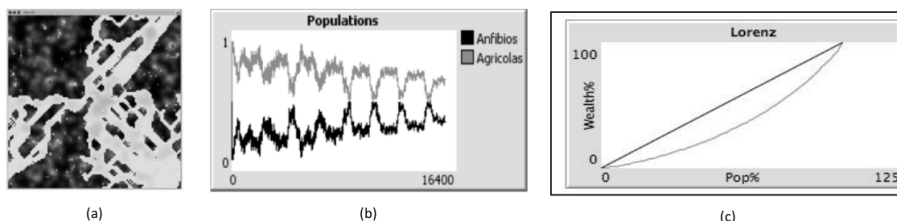


Figura 8. Modelación con agentes. (a) Representación del suelo, inundación y población. (b) Tamaño de poblaciones en el tiempo. Anfibios: población que se adapta a los procesos de inundación. Agrícolas: población que se adapta a las condiciones secas. Se observa la variación de las poblaciones en función de los periodos de inundación. (d) Diagrama con el área comprendida entre la curva de Lorenz y la bisectriz del cuadrado, proporcional al coeficiente de Gini [32].

Allí se observa el territorio de la Mojana con sus características representadas en el uso del uso. La mancha de inundación reflejada en los niveles de agua y las interacciones de los agentes con este territorio. También son representados los asentamientos y los niveles de vulnerabilidad, destacados por tener diferentes tonalidades. Para esta primera simulación se hizo un análisis de reglas en el marco de la teoría evolutiva [32]. Dado que las reglas son preestablecidas y no tienen la posibilidad de ser modificadas desde los agentes, se puede manifestar que no se percibe variación desde el nivel macro [47]. Sin embargo, a partir de los frecuentes cambios de estado del sistema que ocurren en el nivel micro, es posible apreciar que en el nivel meso (i.e. razas, clases sociales y entornos) se configura una variedad de tendencias en cuanto a velocidad, asentamiento, crecimiento y adaptabilidad. En el nivel micro es más evidente la presencia y la influencia de la variación; la diversidad se manifiesta en el hecho que la población inicial de los agentes está dividida en dos razas: agrícolas y anfibios que a su vez pueden adoptar dos roles diferentes, el de búsqueda y el de asentamiento. Los sistemas selectivos según Campbell [51] eliminan o propagan variaciones específicas. Respecto a

los selectores, se pueden identificar: sobrevivencia de grupos sociales, difusión selectiva entre grupos sociales, propagación de variaciones temporales y selección racional. Según Campbell [51] es notorio que las tradiciones se vean cada día más retenidas en el patrimonio material más que en la memoria oral-cultural. Este se ve reflejado en artefactos que perturban los procesos de aprendizaje de los individuos tanto como el ambiente natural. Además, Dopfer sugiere que el conocimiento no solo puede ser transportado por los agentes económicos sino también por los artefactos culturales que estos producen. Este sistema de retención se puede observar en diversos ambientes. En el caso de la Mojana, predomina una economía que gira en torno a la ganadería extensiva dando lugar a una cultura centrada en esta labor y desplazando prácticas culturales antiguas centradas en el agua [32]. La cultura ganadera extensiva se manifiesta materialmente a través de un paisaje poblado de artefactos para la crianza bovina, por ejemplo corrales, cercas, caminos y bebederos entre otros [32].

4. Discusión y conclusiones

En esta investigación se presenta una propuesta para la modelación integrada de un sistema socio-ecológico complejo, a partir de la modelación hidrodinámica y de los sistemas de agentes. Adicionalmente, son expuestos los avances de un ejercicio de modelación realizado en la ecorregión de la Mojana, municipio de Nechí.

Se pudo establecer que la herramienta ISIS 2D arroja los niveles de inundación del río y la velocidad que permiten representar la mancha de inundación. Así mismo los sistemas de agentes, desarrollados en NetLogo, evidencian que esta herramienta resulta ser útil para la generación de escenarios en el marco de la planeación, al representar las interacciones entre los agentes y los recursos naturales.

En los últimos años, los trabajos de modelación del territorio han ido aumentando [28], debido a que en algunas situaciones los modelos convencionales, o las herramientas empleadas, no logran llegar al nivel de detalle requerido y tampoco integran diferentes técnicas de modelación, y el conocimiento de los expertos. Con los procesos de modelación integrada se busca abordar el problema de la modelación desde una perspectiva que contemple escenarios de modelación espacio-temporal, donde puedan participar diseñadores y actores interesados.

Este estudio permitió evidenciar la potencialidad que tienen los métodos numéricos para la simulación del comportamiento de un fluido. No obstante, es necesario realizar ejercicios de refinamiento de mallas y variación de condiciones espaciales y temporales con el fin de generar mayores escenarios de simulación y analizar la estabilidad de las soluciones. Los modelos de simulación son un punto de partida en la toma de decisiones, pero no el único insumo. Desde una perspectiva interdisciplinaria es importante contar con este tipo de herramientas para generar escenarios de intervención, pero se recomienda validar con las comunidades asentadas en el lugar e incluirlas en dichos procesos. Por esto la importancia de la modelación participativa.

Teniendo en cuenta el carácter complejo de las dinámicas en la Mojana, fue fundamental el trabajo de campo y la participación de las comunidades en el proceso de diseño del modelo. Las variables

a modelar, las condiciones del modelo hidrodinámico y los procesos, fueron seleccionados con el apoyo de expertos locales. Se espera que, a futuro, se puedan generar procesos de modelación participativa para la selección de otras variables, el análisis de las escalas, la generación de escenarios y diferentes temáticas a modelar.

Adicionalmente este tipo de investigaciones contribuye al fortalecimiento del Sistema Nacional de Gestión del Riesgo (Ley 1523 de 2012-Colombia), en la medida que aporta a su conocimiento. Las herramientas de simulación como ISIS 2D y la simulación con agentes pueden generar escenarios para la toma de decisiones frente a alternativas como el manejo de los caños, la construcción de infraestructura y el fortalecimiento de los procesos de educación.

En los modelos integrados es importante el uso de diferentes escalas, resoluciones espaciales y temporales. De tal manera que para la modelación dinámica de un río se puede usar un modelo de espacio continuo y puede estar vinculado a un modelo ecológico, utilizando un modelo espacial regional. Según Letcher *et al.*, (2013) [25] la conceptualización de las interacciones, la elección de la agregación o desagregación es subjetiva y es probable que afecte los resultados del modelo. De tal manera que el modelo puede ser rediseñado variando las escalas espacio-temporales. En este sentido, como trabajo futuro para el caso del territorio de la Mojana, se desean explorar diferentes escalas espacio-temporales enmarcadas en el propósito de la modelación y en la definición de los procesos a modelar.

Referencias

- [1] L. Parrott, "Hybrid modelling of complex ecological systems for decision support: Recent successes and future perspectives". *Ecological Informatics*, 6(1), 2011, pp. 44–49. [En línea] Disponible en: <http://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2010.07.001>
- [2] DNP and FAO, *Programa de desarrollo sostenible de la región de la Mojana, Colombia*. I. G. Comunicaciones, Ed., (Primera ed). Bogotá D.C., 2003.
- [3] G. Harris & G. Harris, Seeking sustainability in an age of complexity. *Seeking Sustainability in an Age of Complexity*, 2007. [En línea] Disponible en: <http://doi.org/10.1017/CBO9780511815140>
- [4] S. A. Levin, (1998). Ecosystems and the Biosphere as Complex Adaptive Systems. *Ecosystems*, 1(5), 431–436. <http://doi.org/10.1007/s100219900037>.
- [5] L. Parrott, (2002). Complexity and the Limits of Ecological Engineering. *American Society of Agricultural Engineers I*, 45(5), 1–6.
- [6] D. A. Meyer, (1997). Towards the global: complexity, topology and chaos in modelling, simulation and computation 1 Introduction 2 Hierarchical e ciencia 3 Topology induces complexity, (September), 0–5.
- [7] Dawn C. Parker, Berger Thomas and S. M. M. (2002). Agent-Based Models of Land-Use and Land-Cover Change. *LUCC Report Series*, (6), 140.
- [8] F. Bousquet and C. Le Page, (2004). Multi-agent simulations and ecosystem management: a review. *Ecological Modelling*, 176(3-4), 313–332. <http://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2004.01.011>.
- [9] R. B., Matthews, N. G. Gilbert, A. Roach, J. G. Polhill and N. M. Gotts, (N.d.). Agent-based land-use models: a review of applications. *LANDSCAPE ECOLOGY*. Retrieved from <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=edswsc&AN=000250632100005&lang=es&site=eds-live>.
- [10] L. An, (2012). Modeling human decisions in coupled human and natural systems: Review of agent-based models. *Ecological Modelling*, 229, 25–36. <http://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2011.07.010>
- [11] S. Balbi, C. Giupponi, P. Pérez, and M. Alberti, (2013). A spatial agent-based model for assessing strategies of adaptation to climate and tourism demand changes in an alpine tourism destination. *Environmental Modelling and Software*, 45, 29–51. <http://doi.org/10.1016/j.envsoft.2012.10.004>.

- [12] D. Brown, S. Page, R. Riolo and W. Rand, (2004). Agent-based and analytical modeling to evaluate the effectiveness of greenbelts. *Environmental Modelling & Software*, 19(12), 1097–1109. <http://doi.org/10.1016/j.envsoft.2003.11.012>.
- [13] O. Barreteau and F. Bousquet, (2000). SHADOC: a multi-agent model to tackle viability of irrigated systems. *Annals of Operations Research*, 94(1-4), 139–162
- [14] P. Schreinemachers and T. Berger, “An agent-based simulation model of human-environment interactions in agricultural systems”. *Environmental Modelling and Software*, 26(7), 2011, pp. 845–859, [En línea] Disponible en: <http://doi.org/10.1016/j.envsoft.2011.02.004>
- [15] S. Balbi, A. Prado, P. Gallejones, C. P. Geevan, G. Pardo, E. Pérez-Miñana and F. Villa, “Modeling trade-offs among ecosystem services in agricultural production systems”. *Environmental Modelling & Software*, 72, 2015, pp. 314–326, [En línea] Disponible en: <http://doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.12.017>
- [16] B. Anselme, F. Bousquet, A. Lyet, M. Etienne, B. Fady, and C. Le Page, Modelling of spatial dynamics and biodiversity conservation on Lure mountain (France). *Environmental Modelling & Software*, 25(11), 2010, pp. 1385–1398. [En línea] Disponible en: <http://doi.org/10.1016/j.envsoft.2009.09.001>
- [17] P. Kroes, Technical Artefacts: Creations of Mind and Matter: A Philosophy of Engineering Design, *Philosophy of Engineering and Technology* 6, 2012, pp. 127- 161, [En línea] Disponible en: <http://doi.org/10.1007/978-94-007-3940-6>
- [18] H. Arendt, *Trabajo. En La condición humana*, 2007, pp. 157–191. Editorial: PAIDOS IBERICA. Barcelona.
- [19] J. Epstein, “Why model? *Journal of Artificial Societies and Social*, 11(4), 2008, p. 6. [En línea] Disponible en: <http://doi.org/10.1080/01969720490426803>
- [20] M. Schwaninger, “Model-based management (MBM): a vital prerequisite for organizational viability”. *Kybernetes*, 43(6), 2010, pp. 1419 - 1428.
- [21] G. Restrepo, Aproximación Cultural al Concepto de Territorio. *Revista Perspectiva Geográfica*, 3, 2010, [En línea] Disponible en: http://datateca.unad.edu.co/contenidos/100007/Leturas_apoyo_Act6/Aproximación_cultural_al_concepto_de_territorio_banrepcultural.org.pdf
- [22] R. Barthel, S. Janisch, N. Schwarz, A. Trifkovic, D. Nickel, C. Schulz and W. Mauser, “An integrated modelling framework for simulating regional-scale actor responses to global change in the water domain”. *Environmental Modelling & Software*, 23(9), 2008, pp. 1095–1121, [En línea] Disponible en: <http://doi.org/10.1016/j.envsoft.2008.02.004>
- [23] CEPAL, *Población y Desarrollo. Modelos demográficos para la proyección de la demanda del sector social*, 2007. Editorial CEPAL. Santiago de Chile.
- [24] M. Schwaninger and M. Janovjak, Institut für Betriebswirtschaft (Eds.), “Model-Based Management: A Systemic Approach from the Pharmaceutical Industry”. *Diskussionsbeiträge*, 56. St. Gallen, 2008.
- [25] R. A. Kelly, A. J. Jakeman, O. Barreteau, M. E. Borsuk, S. ElSawah, S. H. Hamilton and A. A. Voinov, “Selecting among five common modelling approaches for integrated environmental assessment and management”. *Environmental Modelling & Software*, 47, 2013, pp. 159–181. [En línea] Disponible en: <http://doi.org/10.1016/j.envsoft.2013.05.005>
- [26] A. Voinov and F. Bousquet, “Modelling with stakeholders”. *Environmental Modelling & Software*, 25(11), 2010, pp. 1268–1281. <http://doi.org/10.1016/j.envsoft.2010.03.007>
- [27] M. A. Max-Neef, *Desarrollo a escala humana*, 1993. Editorial Nordan-Comunidad. Montevideo, Uruguay.
- [28] T. Berger, R. Birner, N. McCarthy, J. Díaz and H. Wittmer, “Capturing the complexity of water uses and water users within a multi-agent framework”. *Water Resources Management*, 21(1), 2006, pp. 129–148. [En línea] Disponible en: <http://doi.org/10.1007/s11269-006-9045-z>
- [29] J. C. Refsgaard, J. P. van der Sluijs, A. L., Hojberg & P. A. Vanrolleghem, “Uncertainty in the environmental modelling process – A framework and guidance”. *Environmental Modelling & Software*, 22(11), 2007, pp. 1543–1556. [En línea] Disponible en: <http://doi.org/10.1016/j.envsoft.2007.02.004>
- [30] CORPOICA, *El plan de la Mojana: aplicación del nuevo paradigma de desarrollo sostenible*. CORPOICA, Vol 2, 1998.
- [31] L. Posada, “Si no se concluyen las obras en La Mojana, el desastre será peor”. 2012, *UN periódico*.
- [32] P. A. Villegas, M. Melgarejo, and E. Pérez, *MOJANA: Modelo Organizacional Jerárquico de Agentes Naturales del Agua*. En proceso de publicación.
- [33] Triviño, N., Escobar, J.A., and Villegas, P.A. *Modelación numérica bidimensional de escenarios de inundación en el municipio de Nechí Antioquia*. Proyecto de grado para optar al título de Ingeniera Civil. Facultad de Ingeniería.

- Pontificia Universidad Javeriana, 2015.
- [34] U. Wilensky, (1998). NetLogo Wealth Distribution model. *Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling*, Northwestern University, Evanston, IL. [En línea] Disponible en: <http://ccl.northwestern.edu/NetLogo/models/WealthDistribution>
- [35] M. Felsen and U. Wilensky, *NetLogo Urban Suite - Sprawl Effect model*, Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling, Northwestern University, Evanston, IL, 2007, [En línea] Disponible en: <http://ccl.northwestern.edu/NetLogo/models/UrbanSuite-SprawlEffect>
- [36] G. Dunham, S. Tisue and U. Wilensky, *NetLogo Erosion model*. Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling, Northwestern University, Evanston, IL, 2004, [En línea] Disponible en: <http://ccl.northwestern.edu/NetLogo/models/Erosion>
- [37] ISIS, *User Manual, ISIS 2D Cost effective, integrated software solutions*. CHM2HILL, 2014.
- [38] D. Wirasaet, E. J Kubatko, C. E Michoski, S. Tanaka, J. J Westerink and C, Dawson. "Discontinuos Galerkin methods whith nodal and hybrid modal/nodal triangular, quadrilateral and polygonal elements for nonlinear shallow water flow". *Computer methods in applied mechanics and engineering*, 270, 2014, pp. 113- 149.
- [39] P. Kundu and L. Cohen, *Fluid Mechanics*. California, Academic, 1990.
- [40] Henderson-Sellers and P. Giorgini, *Agent-Oriented Methodologies*. Idea group Inc. pp. 406. 2005.
- [41] T. Filatova, P. H. Verburg, D. C. Parker, and C. A. Stannard, "Spatial agent-based models for socio-ecological systems: Challenges and prospects". *Environmental Modelling & Software*, 45, 2013, pp. 1–7. [En línea] Disponible en: <http://doi.org/10.1016/j.envsoft.2013.03.017>
- [42] O. P. R., Van, M. S. Krol, A. Hoekstra and R. R. Taddei, "Feedback mechanisms between water availability and water use in a semi-arid river basin: A spatially explicit multi-agent simulation approach". *Environmental Modelling & Software*, 25, 2010, pp. 433–443.
- [43] Z. Sun and D. Muller, "A framework for modeling payments for ecosystem services with agent-based models, Bayesian belief networks and opinion dynamics models". *Environmental Modelling & Software*, 45, 2013, pp. 15-28.
- [44] USGS, *Science for changing world*, 2015, [En línea] Disponible en: <http://glovis.usgs.gov>
- [45] G. Remolina, *Del "BIG BANG" de las ciencias a su integración en el pensamiento complejo*, 2014. Bogotá.
- [46] J. A. Amozurrutia, *Complejidad y ciencias sociales. Un modelo adaptativo para la investigación interdisciplinaria* (Primera ed), 2011, [En línea] Disponible en: http://www.ceiich.unam.mx/0/51LibFic.php?tblLibros_id=449
- [47] K. Dopfer, *Evolutionary economics: a theoretical framework. The Evolutionary Foundations of Economics*, 2005, [En línea] Disponible en: <http://doi.org/http://dx.doi.org/10.1017/CBO9780511492297>
- [48] C. Olaya, "Models that Include Cows: The Significance of Operational Thinking". *30th International Conference on System Dynamics Society*, 2012, pp. 1–19.
- [49] M. Aguilera, *La Mojana: riqueza natural y potencial económico. Documentos de trabajo sobre economía regional*, 2004. Editorial Banco de la República. Cartagena.
- [50] A. Serna, *Memorias en crisoles propuestas teóricas, metodológicas y estratégicas para los estudios de memoria*. IPAZUD, Instituto para la Pedagogía, Bogotá, D.C., Ed. Igarss 2014, [En línea] Disponible en: <http://doi.org/10.1007/s13398-014-0173-7.2>.
- [51] D.T Campbell, *Variation and Selective Retention in Sociocultural Evolution* in Social Change in Developing Areas: A Reinterpretation of Evolutionary Theory, H.R. Barringer, G.I. Blanksten, and R.W. Mack, Editors. 1965, Schenkman: Cambridge, Mass. p. 19-49
- [52] Rodríguez, C. (2014). Modelamiento de estaciones TransMilenio mediante Autómatas Celulares: lecciones aprendidas. En: *Ingeniería*, Vol. 19, No. 2, pp. 105–113.

Paula Andrea Villegas González

Institución, Pontificia Universidad Javeriana; afiliación: Instituto Geofísico; Facultad de Ingeniería, estudiante Doctorado en Ingeniería Pontificia Universidad Javeriana; docente Investigadora Universidad Católica de Colombia; magister en Hidrosistemas Pontificia Universidad Javeriana; ingeniera Civil Universidad Nacional de Colombia. Correo electrónico: pvillegas@javeriana.edu.co

Nathaly Triviño León

Institución, Pontificia Universidad Javeriana; afiliación: Facultad de Ingeniería, estudiante Maestría en Hidrosistemas

Pontificia Universidad Javeriana; ingeniera Civil Pontificia Universidad Javeriana. Correo electrónico: ntrivino@javeriana.edu.co

Jorge Alberto Escobar Vargas

Institución, Pontificia Universidad Javeriana; afiliación, Facultad de Ingeniería; docente, Pontificia Universidad Javeriana; doctor Mecánica de Fluidos Computacional University Cornell; magister en Métodos Numéricos para el Cálculo y Diseño en Ingeniería, Universidad Politécnica de Cataluña; magíster en Hidrosistemas Pontificia Universidad Javeriana; magíster en Mecánica de Fluidos Ambiental, Cornell University; ingeniero Civil, Universidad Nacional. Correo electrónico: jorge-escobar@javeriana.edu.co

Nelson Obregón Neira

Institución, Pontificia Universidad Javeriana; afiliación, Director Instituto Geofísico, Facultad de Ingeniería; docente, Pontificia Universidad Javeriana; postdoctorado University of California Santa Barbara; doctorado en Hydrologic Sciences University of California Santa Barbara; magíster en Ingeniería Civil Universidad de los Andes; Ingeniero Civil, Universidad Francisco de Paula Santander. Correo electrónico: nobregon@javeriana.edu.co

Mauricio González Méndez

Institución, Universidad Católica de Colombia; afiliación, Facultad de Ingeniería, Docente Universidad Católica de Colombia; estudiante de Doctorado en Ingeniería Pontificia Universidad Javeriana; magíster en Ingeniería Ambiental Universidad de los Andes; ingeniero Civil Universidad de los Andes. Correo electrónico: amgonzalez@ucatolica.edu.co

Ramón Eduardo González Salazar

Institución, Pontificia Universidad Javeriana; afiliación, Facultad de Teología Pontificia Universidad Javeriana, docente; magíster en Estudios Políticos, Pontificia Universidad Javeriana; licenciado en filosofía, Universidad Santo Tomas. Correo electrónico: regonzal@javeriana.edu.co

María Juliana Flórez Flórez

Institución, Pontificia Universidad Javeriana; afiliación, Instituto Pensar Pontificia Universidad Javeriana, docente; doctora en Psicología Social, Universitat Autònoma de Barcelona; maestría en Psicología Social, Universitat Autònoma de Barcelona; especialización en Cooperación y Desarrollo; licenciada en Psicología. Correo electrónico: florez.maria@javeriana.edu.co

Artículo de reflexión

Transformación de la no-Complejidad a la Complejidad

*Transformation of non-Complexity to Complexity***Carlos Eduardo Maldonado¹**

¹Profesor Titular, Facultad de Ciencia Política y Gobierno, Universidad del Rosario.
Correo electrónico: carlos.maldonado@urosario.edu.co

Recibido: 23-11-2015. Modificado: 13-04-2016. Aceptado: 25-07-2016

Resumen

Contexto: Este artículo aborda un problema nuevo y difícil: la manera como un fenómeno o sistema simple o lineal puede ser transformado gracias a la geometría de fractales en un sistema o fenómeno complejo. En este sentido, el contexto es el de las ciencias de la complejidad. El problema es altamente significativo, pues de manera general siempre se ha dicho que la complejidad trata, entre otros, con comportamientos no-lineales.

Método: El método es eminentemente teórico. En la bibliografía especializada el problema nunca se ha trabajado, y si sí, cómo un sistema simple o complicado puede ser cambiado en uno complejo o no-lineal.

Resultados: Los resultados indican que es posible abordar el problema y resolverlo satisfactoriamente, atendiendo a los más destacados antecedentes en la materia. Se presentan varios argumentos que remiten entre otros a G. Julia y Mandelbrot.

Conclusiones: La conclusión es que la geometría de fractales suministra bases suficientes para estudiar la transformación estudiada. Así, la importancia teórica y práctica del problema considerado puede extenderse a numerosos campos; aquí se explora y se muestra, por primera vez, cómo dicha transformación es posible.

Palabras clave: Cambio, complejidad, geometría de fractales, métodos analíticos, revolución científica.

Idioma: Español



Citación: C.E. Maldonado, "Transformación de la no-Complejidad a la Complejidad," INGENIERÍA, vol. 21, no. 3, pp. 411-426, 2016.

© Los autores; titular de derechos de reproducción Universidad Distrital Francisco José de Caldas. En línea DOI: <http://dx.doi.org/10.14483/udistrital.jour.reveng.2016.3.a10>

Abstract

Context: This paper deals with a new and most difficult problem, namely the way in which a simple or linear system or phenomenon can be transformed into a complex or non-linear phenomenon or system thanks to the fractals geometry. In this sense, the framework is set out by the sciences of complexity. Such a problem is extremely important, for in general it has been said that complex science deals, among others, with non-linear behaviors. As a conclusion, the geometry of fractals provides bases solid enough to study the transformation herewith considered. The theoretical and practical meaning of the problem raised here can be extended to numerous fields. Here such a transformation is explored and shown for the first time.

Method: The method here is theoretical. However, in the specialized bibliography the problem considered here has never been worked out, namely: whether, and if so how a simple or complicated system can be changed into a complex or non-linear one.

Results: Working on the basis of fractal geometry the transformation from linear systems into non-linear is possible. Various arguments are shown that support an idea that sends back to G. Julia and Mandelbrot.

Conclusions: As a conclusion, the geometry of fractals provides bases solid enough to study the transformation herewith considered. The theoretical and practical meaning of the problem raised here can be extended to numerous fields. Here such a transformation is explored and shown for the first time.

Keywords: Complexity, fractal geometry, analytical methods, change, scientific revolution

Preámbulo

Cabe distinguir tres clases de sistemas, fenómenos o comportamientos así: sistemas simples, complicados y complejos. Un sistema simple es aquel que puede ser entendido —y en el orden de la praxis gestionado—, en términos agregativos o compositivos. Sin embargo, al mismo tiempo, es simple todo aquello que se puede comprender y manejar en términos de análisis, pues analizar consiste en dividir, compartimentar, fragmentar, segmentar.

Conjuntos de sistemas simples dan lugar a sistemas complicados. En este sentido, entonces, la manera habitual de tratar a los sistemas complicados es en términos, por ejemplo, de distribuciones normales, estadística descriptiva e inferencial, promedios, estándares, matrices y vectores. En el corpus de complejidad (*complexity science*) es habitual distinguir tal clase de fenómenos o comportamientos. Kuhnianamente hablando los sistemas simples y complicados constituyen ciencia normal.

Otra manera de entender a ambos sistemas es que, en el marco del trabajo e interés por las ciencias de la complejidad, sirven sencillamente como grupo de control. Toda la atención, en contraste, se desplaza hacia el tercer grupo: sistemas, fenómenos o comportamientos complejos. Este artículo trata del tercer grupo a partir de un problema central: comprender cómo los sistemas no-complejos

—por definición, simples o complicados—, dan lugar, o pueden ser transformados en sistemas complejos en el sentido propio de la palabra. Como es sabido, no existe una única definición de complejidad y la buena ciencia no parte de, ni trabaja tampoco con definiciones. La manera habitual de comprender a un sistema complejo es por sus atributos o propiedades; entre otros, no-linealidad, emergencia, autoorganización, turbulencias, fluctuaciones, comportamiento colectivo complejo y adaptación.

1. Introducción

Los dos problemas fundamentales de la complejidad son¹: el tiempo y la no-linealidad. Presento la expresión “los dos problemas fundamentales de la complejidad” en analogía al estudio clásico de K. Popper —Los dos problemas fundamentales de la epistemología, redactado originalmente en 1930-33—, solo que el contexto y los problemas son diferentes. Mientras que para Popper los dos problemas fundamentales de la epistemología eran el problema de la inducción y el criterio de demarcación, para nosotros el tema es el de las ciencias de la complejidad. Vale recordar que Popper logra resolver el primer problema pero deja abierto el segundo.

Pues bien, el primer problema de la complejidad, el tiempo, constituye el motivo central de la primera de las ciencias de la complejidad² a saber: la termodinámica del no-equilibrio; pero en el *corpus* de los clásicos de la complejidad termina en la exploración y formulación de la cuarta ley de la termodinámica por parte de S. Kauffman [1]. Al fin y al cabo, por ejemplo cuando en 1977 la Academia de Ciencias de Noruega le confiere el Premio Nobel a I. Prigogine especifica: “Prigogine introdujo en la ciencia lo que la ciencia no tenía: tiempo, historia”. Toda la obra de Prigogine pivota, notablemente, en torno a la importancia del tiempo: desde sus estudios sobre la física del ser a la física del devenir, la discusión sobre si el tiempo es o no una ilusión, como lo sostenía Einstein, y su importancia en la metamorfosis de la ciencia (léase, revolución científica). Un espacio al primer problema fundamental de la complejidad se encuentra en [2], [3].

Así pues, quiero plantear que el segundo problema fundamental de la complejidad consiste, sin lugar a dudas, en el estudio acerca de si y cómo la linealidad se transforma o puede transformarse en no-linealidad. Este texto se ocupa de dicho problema y contribuye a resolverlo, que es *malgré* Prigogine, el más importante y difícil. A continuación, de manera inmediata, este texto aborda la elucidación del enunciado que se acaba de introducir. En este sentido, el núcleo apunta hacia la geometría de fractales como a la instancia en la cual y gracias a la cual es posible resolver el segundo problema mencionado.

A fin de estudiar este problema, este texto se articula en cinco partes, así: en un primer momento se aborda la importancia de la fenomenología en la complejidad, algo que es particularmente im-

¹Este artículo forma parte del proyecto de investigación “Complejidad y ciencias sociales”, financiado por el CEPI de la Facultad de Ciencia Política y Gobierno de la Universidad del Rosario.

²La termodinámica del no-equilibrio es cronológica o históricamente hablando la primera de las ciencias de la complejidad, algo que, a su manera, pone en claro L. Margulis (What is Life?). Las ciencias de la complejidad se componen, a mi modo de ver, de la termodinámica del no-equilibrio, el caos, los fractales, la teoría de catástrofes, la vida artificial, las redes complejas y las lógicas no-clásicas [3].

portante en Prigogine y en Mandelbrot; en segunda instancia, el argumento gira hacia la topología y los fractales, mostrando cómo la geometría de fractales constituye un paso radical hacia adelante relativamente a la topología; gracias a este segundo argumento es posible sostener, en tercer lugar,

la historia del pensamiento fractal, tanto a la luz de lo expuesto por el propio B. Mandelbrot, como por parte de la historia de la matemática y la lógica; el cuarto argumento destaca la importancia de los fractales para pensar patrones, pautas (*patterns*); al final se elaboran unas conclusiones generales y el texto termina con una coda, en estrecha relación con lo tratado, abriendo la referencia, o complementándola, en otra dirección.

2. ¿Por qué razón la no-linealidad se revela como más importante que el tiempo?

En la comunidad de complejólogos hace rato que el problema del tiempo ha sido reconocido como fundamental (Kauffman, Solé, Goodwin, y muchos otros). De hecho, sin duda, el primero de los rasgos que abre de manera definitiva la puerta a la consolidación de las ciencias de la complejidad como una novedosa inflexión en la historia de la ciencia [4] es el tiempo. De manera puntual, se trata, en contraste con el papel negativo que le asigna al tiempo la termodinámica clásica y más específicamente el segundo principio de la entropía, del reconocimiento del papel creador o generador de estructuras de complejidad creciente por parte del tiempo. Anticipado por Darwin, este papel creador del tiempo es el resultado de la obra de Prigogine y de lo que ha llegado a conocerse como la termodinámica del no-equilibrio. Dicho sin más, en complejidad el tiempo: a) no es una variable y b) es (lo que determina) la complejidad misma de un fenómeno o sistema.

En contraste con el tiempo, la no-linealidad se encuentra lejos de ser un problema evidente o resuelto, incluso en buena parte de la comunidad de complejólogos. Parcialmente, esto se debe porque no existe una única comprensión de la no-linealidad, si bien sí hay un espacio amplio gracias al cual es posible explicarla y entenderla. Sin embargo, la principal dificultad con respecto a la no-linealidad estriba en el hecho de que en la ciencia normal —en el sentido más amplio e incluyente de la palabra— existen métodos analíticos de tratar y de trabajar con sistemas y fenómenos no-lineales. En rigor, estos métodos consisten en una linealización de la no-linealidad. Los ejemplos más conspicuos son: sistemas estocásticos, análisis numérico, constante de Liapunov y sistemas L (de Lindenmeier), aunque puede mencionarse, sin dificultad alguna, la asunción habitual de quienes trabajan en modelamiento y simulación de sistemas complejos, en una amplia mayoría, optan de entrada por parametrizar las dinámicas no-lineales, echando así por la borda la no-linealidad. De hecho, campos vecinos a la complejidad como la cibernética en general, y la cibernética de segundo y de tercer orden en particular, al igual que los enfoques sistémicos le hacen el juego a la ciencia normal en esta dirección o, lo que es equivalente, le hacen un flaco favor a la comprensión de la complejidad misma de la no-linealidad, puesto que, en el mejor de los casos la asumen como una cuestión de lenguaje (*semantics*).

En propiedad, en complejidad se debe hablar de la no-linealidad de fenómenos y sistemas complejos. En otras palabras, la no-linealidad es un atributo propio de la complejidad. De esta suerte se apunta al no-reduccionismo y no linealización de la no-linealidad. Hay autores que incluso, debido

a esta observación prefieren hablar no de ciencias de la complejidad sino de ciencias no-lineales, a saber: exactamente en el sentido de la no linealización de la no-linealidad [5].

La clave mediante la cual es posible entender el carácter fundamental de la no-linealidad en complejidad estriba en el reconocimiento explícito de que un fenómeno no-lineal se caracteriza porque gana información (aunque no necesariamente memoria). Así, la no-linealidad y la ganancia de información son mutuamente complementarios. Naturalmente que otras caracterizaciones de la no-linealidad han sido posibles, pero para efectos de este texto, baste con la comprensión señalada: la no-linealidad es información ganada y así, si se prefiere, una no proporcionalidad entre causa(s) y efecto(s).

Digámoslo de manera franca: el problema medular de la complejidad que aquí nos interesa es el de la(s) transformación(es) de la linealidad en no linealidad. Más exactamente, el problema consiste en lo siguiente: se trata de determinar:

Si, cuándo y cómo un sistema lineal se convierte en uno no-lineal; o bien,

Si, cuándo y cómo un sistema lineal puede ser transformado en uno no-lineal.

En el primer caso, se trataría de estudiar cómo sucede, digamos física u objetivamente, que un sistema determinado rompe la/su linealidad y se torna en un fenómeno no-lineal. Las contribuciones más clásicas al respecto provienen del caos y, más recientemente, de las redes complejas, por ejemplo gracias al estudio de los fenómenos de percolación o las cascadas de errores. El estudio de los solitones, por ejemplo [5] y la producción o emergencia de tsunamis constituye un caso específico. No es este mi interés aquí. Tanto menos cuanto que, en el mejor de los casos, la explicación de esta clase de fenómenos o de situaciones se explica o se entiende *ex post*.

Por el contrario, me propongo dirigir la mirada hacia el segundo de los casos mencionados, esto es, establecer si y cómo un sistema lineal puede ser transformado en uno no-lineal, ello independientemente de si el agente que lleva a cabo dicha transformación es humano, natural o artificial. La transformación de un fenómeno lineal en uno no-lineal es, en términos matemáticos, una transformación geométrica, pero en términos prácticos se traduce en planos apasionantes como la política o la sociología y que deben, sin embargo, quedar aquí de lado por motivos de espacio.

Mientras que la geometría euclidiana es una abstracción humana cuyo resultado consiste en negar la naturaleza e imponerle formas rígidas, polígonos regulares y construcciones antinaturales, la geometría de fractales corresponde a una naturalización de la geometría. Asistimos así al tránsito de una antropologización de la geometría (= Euclides), esto es, del espacio y por tanto del mundo y la naturaleza, a una naturalización de los mismos (Mandelbrot). El resultado es una revolución magnífica en dos planos.

En verdad, de un lado, se trata del tránsito de un modelo continuo del espacio, el mundo y la naturaleza, a una comprensión discreta de los mismos. Así, la búsqueda e identificación de patrones se corresponde, plano por plano con el descubrimiento de las matemáticas discretas o, lo que es equivalente, de las matemáticas de sistemas discretos. Con seguridad, los componentes centrales de

esta clase de matemáticas comprenden los teselados, conjuntos extremos, conjuntos parcialmente ordenados, enumeración, teoría de redes, grafos e hipergrafos y la teoría de la codificación.

De otra parte, al mismo tiempo, la búsqueda de patrones abre una perspectiva más natural, o naturalista si se prefiere, de la geometría y, por tanto, del estudio y comprensión del espacio. El resultado habrá de ser el re-descubrimiento de la armonía como un criterio científico y, con ella y más allá de ella, el redescubrimiento de la belleza como un criterio mismo de verdad y validez [6].

3. Complejidad y fenomenología, un nexo sólido

Las relaciones entre la fenomenología, como método científico y las ciencias de la complejidad en general es sólido, si bien no muy extendido. En diversas ocasiones, I. Prigogine menciona la importancia de las descripciones fenomenológicas en el desarrollo de sus investigaciones (cfr. *La nueva alianza, El nacimiento del tiempo y el libro escrito conjuntamente con G. Nicholis, La estructura de lo complejo*)³. Algo similar puede evidenciarse en algunos pasajes de la obra de Mandelbrot. Ello, sin embargo, no significa que la complejidad se funde en métodos y aproximaciones fenomenológicos como quisieran considerarlo filósofos fenomenólogos que sí trabajan sobre ese fundamento en otras áreas del conocimiento [7];⁴ es decir, a la fenomenología en el sentido ya sea de Husserl, Heidegger, Merleau-Ponty o Levinas, para mencionar los nombres más destacados.

En cualquier caso, en el mejor espíritu de la fenomenología como método científico y filosófico el problema de base se formula en los siguientes términos: se trata de distinguir si vemos lo que conocemos o bien si conocemos lo que vemos, un problema que se encuentra en la médula del espíritu, actitud y métodos de la fenomenología en toda la línea de la palabra.

El problema no es trivial, y consiste en clarificar si lo nuevo visto en el mundo se reduce a lo ya conocido y se explica por tanto en términos de lenguajes y experiencias ya adquiridas, o bien si, por el contrario, el investigador se da a la tarea de ver verdaderamente lo nuevo e intentar comprenderlo sin reducirlo a juicios y conceptos ya establecidos. Una ilustración de este problema, sin hacer referencia explícita al cuerpo de la fenomenología, se encuentra en S. Kauffman cuando recuerda la experiencia de los aztecas en su encuentro con los españoles [1] (dicha historia y su significado ha sido estudiada numerosas veces, una muy afortunada referencia es T. Todorov, [17]).

Como se entenderá fácilmente a la luz de una mirada reflexiva, el problema concierne a la capa-

³De manera puntual, hablamos de fenómeno complejo, fenómeno irreversible, fenómenos de intercambio, fenómenos de regulación, fenómenos de relajación, por ejemplo. Digamos, por lo demás, que en el libro con Nicholis, Prigogine prefiere hablar de fenómenos, sistemas y dinámicas complejos en lugar de hacer referencia, genéricamente, de “ciencias de la complejidad”, una expresión que se acuña en el Instituto Santa Fe, en Nuevo México. Parte de la explicación por esta elección por parte de Prigogine está una disputa que tuvo con M. Gell-Mann, pero sobre la cual no cabe aquí hablar.

⁴Dejo aquí de lado cualquier consideración acerca de discusiones más técnicas al interior de la escuelas fenomenológicas, tales como referencias a la fenomenología husserliana o de corte heideggeriano, a la fenomenología francesa del tipo de M. Merleau-Ponty o de E. Lévinas, o acaso también a aproximaciones anglosajonas como las de R. Sokolowski y D. Ihde, B. Benson, entre otros.

cidad de visualización, enfrentamiento y explicación de novedad supuesta la tendencia, natural, a explicar lo nuevo en términos usualmente de analogía o comparación con lo ya conocido.

Pues bien, existe un problema análogo en ciencia. Se trata, expresado, por ejemplo por Einstein, de la disyunción acerca de si pensamos en/con palabras (= signos), o bien en/con diagramas (= símbolos). En el primer caso, puede decirse sin dificultad que se trata de un tipo de pensamiento que favorece aspectos analíticos, en tanto que en el segundo caso se trataría de un acercamiento más visual o sintético a problemas, situaciones, planos del mundo o de la naturaleza.

El padre de la geometría de fractales se inscribe exactamente en este segundo plano y, a través suyo, resuelve el primer problema formulado. En efecto, Mandelbrot expresa en varios lugares que él mismo piensa en términos de diagramas o esquemas y que favorece este tipo de razonamiento sobre el estrictamente analítico, o basado en signos. Extrapolando, y en referencia a la filosofía de las matemáticas en su interpretación más clásica, puede decirse que la geometría de fractales se sitúa, así, más cerca de las tesis intuicionistas (H. Poincaré, Brown) que de las estrictamente formalistas (D. Hilbert). En verdad, el trabajo con fractales es, de plano a plano, el estudio, investigación y disfrute de formas, diagramas, estructuras y gráficos que, si bien, tienen una formulación lógica y matemática, se despliegan ante todo como juegos visuales de gran significado en diversos planos del conocimiento. Gracias a los fractales aprendemos otro tipo de transformación del espacio que el que había sido habitual con Euclides.

Como es sabido, una especificidad de la geometría de fractales es que lleva a cabo operaciones especiales con el espacio. Ya no, como en el caso de Euclides, traslación, reflexión y rotación, y tampoco simplemente como en la topología: torcer, estirar, comprimir. La geometría de fractales lleva a cabo un tercer tipo de operaciones: iteraciones. Ahora bien, en rigor, cabe distinguir dos clases de iteraciones: lineales y no-lineales. Manifiestamente que la iteración constituye un método de resolución de sistemas lineales. Sin embargo, de otro lado, existen igualmente las iteraciones fractales no-lineales cuyo resultado ni es simple, ni complicado y manifiestamente no lineal. Volvemos sobre este asunto en la cuarta sección.

4. Topología y fractales

La geometría de fractales se encuentra, en sus orígenes, en algún lugar intermedio entre la topología y la geometría. La historia y la importancia de la geometría coinciden, plano por plano, con la historia misma de la humanidad occidental y, más radicalmente, con la historia misma del espíritu humano. Tanto más cuanto que la geometría es la ciencia del espacio, el estudio del espacio y más allá de las discusiones entre físicos y matemáticos acerca de si la geometría pertenece al dominio de unos o de otros.

Como es sabido, grosso modo, la historia de la geometría tiene dos grandes capítulos: la geometría euclidiana, formulada originariamente en el libro *Elementos de Euclides* y, a raíz de las discusiones sobre el quinto postulado de Euclides, el desarrollo de las geometrías llamadas no-euclidianas, que nacen en el curso del siglo XIX. Esto es, la geometría de Riemann y de Lobachevsky, con las contribuciones de Bolyai. Solo que, gracias al surgimiento de las geometrías no euclidianas, entonces

se abren tres capítulos nuevos: los fractales, el hiperespacio y la teoría de cuerdas [8]. Dejaremos aquí por razones de delimitación de nuestro tema las referencias al hiperespacio y a la teoría de cuerdas [18]. Dejo aquí de lado las relaciones y distinciones entre la topología estructural y la algebraica, topología de redes, topología dimensional y otros debido a la tesis que define el carácter de este texto.

Por su parte, de manera sucinta, con el nacimiento de las geometrías no-euclidianas, la topología contemporánea se inicia con los trabajos de Euler, pero alcanza su pleno reconocimiento mucho tiempo después, particularmente gracias a los trabajos de S. Smale. Es indudable, sin embargo, que la topología constituye un capítulo fundamental, propio, al interior de la geometría.

El trabajo de la geometría tanto como de la topología coincide en un punto, a saber: en el trabajo con transformaciones en el espacio; transformaciones geométricas, en un caso, y transformaciones topológicas, en el otro. Es fundamental atender a que, particularmente en el caso de la topología, no debe haber rupturas en el espacio, esto es, en, durante o después de las transformaciones operados en la topología. Esta idea permite precisar un concepto general: la geometría es la ciencia del espacio, como la ciencia de las transformaciones en/del espacio, en las que no tienen lugar rupturas del espacio. Estrictamente, se trata de ciencia(s) de sistemas continuos.

Pues bien, en el mismo y en el mejor espíritu de la geometría, el estudio de los fractales también consiste en el estudio de transformaciones geométricas. Más específicamente, las transformaciones que llevan a cabo los fractales son iteraciones. A continuación me ocuparé con mayor detalle de las mismas; su significado estriba en el hecho de que, en contraste con las operaciones de la geometría euclidiana y de la topología, permite acceder, por vía directa, al problema y su resolución de las relaciones entre linealidad y no-linealidad. O bien, como cabe decirlo igualmente, en la transformación de lo no-complejo a la complejidad.

Antes de continuar se impone un pequeño paréntesis histórico. Se trata de esbozar rápidamente los trazos más importantes de los antecedentes y la anatomía de la geometría de fractales. Dicho esbozo es, sin embargo, de gran ayuda, para entender el significado real de las transformaciones fractales que, como lo digo, permiten la transformación de la linealidad en no-linealidad, o bien, lo que es equivalente, de la no-complejidad en complejidad.

4.1. Breve historia del pensamiento fractal

La mejor fuente acerca de los antecedentes del pensamiento fractal ha sido elaborada por B. Mandelbrot, notablemente en los capítulos 40-42 de *La geometría fractal de la naturaleza*: “De los hombres e ideas”. Pero este breve recuento histórico se complementa con el “Epílogo” (capítulo 42) en el que resume su propia trayectoria, que habría de conducir a Mandelbrot hasta la redacción y publicación del libro en 1977, marcando una inflexión fundamental en la historia de la ciencia y, por consiguiente, en la historia de la humanidad occidental.

El principio filosófico fundamental de la geometría de fractales es el mismo que el de las transformaciones geométricas en general ya mencionadas, a saber: el principio de continuidad, que se expresa en la fórmula clásica: *Natura non facit saltus*. Desde este punto de vista, los fractales, en



la visión del propio Mandelbrot, se sitúan en una historia que une a Aristóteles con Leibniz y a Euclides con Cantor.

En consecuencia, la geometría de fractales quiere exponer una idea contundente: existe un orden en la naturaleza que, sin embargo, no es numerable. En otras palabras, se trata de un orden con respecto al cual no cabe una demostración en el sentido tradicional, axiomático, deductivo, por tanto descendiente, de la palabra. Este orden se expresa adecuadamente en términos de grupos y de cuerpos o relaciones conmutativos que, con la ayuda del computador, se manifiestan ulteriormente en términos de simetrías dinámicas. Eso son los conjuntos de Mandelbrot. La ayuda del computador es determinante en un dúplice sentido: de un lado, se trata de la puerta de entrada a las matemáticas de sistemas discretos; y de otra parte, al mismo tiempo, del basamento mismo de las ciencias de la complejidad.

Desde el punto de vista filosófico (= filosofía de las matemáticas), los números reales aparecen como números racionales e irracionales con lo cual se quiere atender a una idea clara: asistimos al nacimiento de una nueva dimensión en la naturaleza que no había sido considerada anteriormente en la historia de la humanidad. A mi modo de ver, la idea de continuidad es más el resultado de una interpretación que le debe mucho al pasado, antes que de un reconocimiento acerca de la *terra incognita* que se abre con la geometría de los fractales.⁵

Dos elementos importantes adicionales en los que se incuba la geometría de fractales son la distribución de Gibbs y la invariancia de cambios de escala. La primera permite derivar todas las relaciones termodinámicas clásicas y cuánticas, algo que no tiene una repercusión inmediata en el estudio de los fractales, pero sí para dirigir la mirada hacia los cambios de escala en el uso y estudio de las funciones; la segunda, por su parte, se ocupa de la ausencia de cambios en la escala de tamaño o en la escala de energía. Pues bien, cuando se estudian los fenómenos fractales y en particular cuando se pone claramente sobre la mesa a plena luz del día la noción de dimensión fractal, observamos justamente las estructuras fractales gracias a las cuales la escala de la parte se corresponde (¡fractalmente!) con la escala del todo.

Lo que debe quedar en claro es que la distribución de probabilidad que caracteriza a los fractales es hiperbólica. El estudio de los fractales está lleno de leyes de potencia y, sin la menor duda, la presencia de leyes de potencia constituye un rasgo distintivo de la existencia o la presencia de un sistema, un fenómeno o un comportamiento complejo.

No en vano, entre los antecedentes más directos de los fractales está el trabajo de Zipf, la ley de Zipf, que la comunidad de complejólogos tan solo acogerá ampliamente a partir de los trabajos de P. Bak [9].

⁵En verdad, como lo mostraré a continuación, la geometría de fractales permite abrir la puerta y cruzar el umbral que conduce hacia los sistemas discretos y con ellos a las matemáticas discretas. Quizás el temor al rechazo por parte de la comunidad científica acerca de sus ideas —algo de lo que habrá de lamentarse incluso veinte años después Mandelbrot—, lo obliga a mirar en la dirección de la continuidad. Aunque, de otra parte, es evidente que cuando Mandelbrot publica en 1977 el texto fundamental sobre los fractales, las matemáticas discretas aún no habían alcanzado un derecho al voto propio o licencia de conducción, por así decirlo.



En cualquier caso, como lo observa Mandelbrot a propósito del libro de 1977, se trata de escritos que “empiezan sin prólogo y acaban sin conclusiones” [19]. “Hoy en día, los casos en que técnicas y conceptos nuevos entran en la ciencia a través de ramas poco competitivas son raros, y por ende anómalos. La geometría fractal es un ejemplo más de tal anomalía histórica” [10].

4.2. Pensar en patrones

Pensar en sistemas, fenómenos y comportamientos complejos corresponde a identificar patrones (*patterns*) (aunque no únicamente). Y precisamente por ello, en este marco, equivale a pensar en términos de conjuntos; así, el marco es, genéricamente, la geometría. Sin embargo, la búsqueda de patrones no es exclusiva de los trabajos en torno a complejidad. Un antecedente notable es el trabajo de G. Bateson [11] en torno a “la pauta que conecta” (*the connecting pattern*); igualmente, Bateson es un autor que nada tiene que ver con complejidad. La ciencia clásica, en contraste, consistió esencialmente en la búsqueda de leyes (*laws*) que marca un espíritu fisicalista en ciencia e investigación.

En rigor, el desarrollo de y el trabajo con patrones constituye el mérito de la lógica y de la matemática de finales del siglo XIX y comienzos de siglo XX. Antes, la ciencia en general estaba marcada por la idea de leyes y legalidad, de objetos y a lo sumo de relaciones entre ellos. Sin duda, el paradigma es el de la mecánica clásica con Newton y su epítome.

Los nombres que inauguran la tradición que pivota en torno a la búsqueda e identificación de patrones son, con seguridad, Cantor, Peano, Koch, Klein, Julia, todos nombres que se encuentran entre los antecedentes, directos o indirectos de la geometría de fractales. En consecuencia, una observación puntal se impone: una cosa es una iteración de Peano o Cantor, por ejemplo, y otra muy distinta la de Mandelbrot. Aquella es lineal, en tanto que su mérito consiste en haber subrayado el papel de las iteraciones, cuyo resultado es la fractalidad misma. Digámoslo de forma directa: la fractalidad constituye otro de los rasgos distintivos de un sistema complejo.

La idea que emerge inmediatamente es la del trabajo con conjuntos como el trabajo mismo con iteraciones, gracias a las cuales, por lo demás, con Cantor logramos ganar la idea de infinito y, más exactamente, de infinitos infinitos⁶. Como se aprecia, con Cantor, la iteración de una misma operación, o de un mismo patrón, permite al cabo encontrar el infinito (conjuntos infinitos). Por su parte, H. von Koch desarrolla hacia 1904 el famoso conjunto de Koch que corresponde a la geometría de un copo de nieve, el cual es posible igualmente sobre la base de un proceso iterativo. Sin embargo, como quiera que sea, el primero que lleva a cabo un trabajo de transformación del espacio en términos de identificación de patrones fue Möbius en 1858 [12].

Entre los trabajos pioneros de conjuntos que habrían de conducir, ulteriormente, al desarrollo de

⁶El infinito es descubierto o inventado tres veces en la historia de la humanidad y siempre por parte de las matemáticas. La primera vez fue gracias a G. Bruno, en particular en su obra *El universo infinito y los mundos*, en el siglo XVI. El trabajo de Bruno se plasmó en la astrofísica y la cosmología. El Cardenal Bellarmino (jesuita) juzgó y condenó a la hoguera a Bruno por considerar conceptos contrarios a la Iglesia católica. En efecto, el concepto mismo de “infinito” no aparece en el *Libro de los Libros*. La segunda vez tuvo lugar gracias a G. Cantor, quien no solamente descubre o inventa el infinito sino, mejor aún, infinitos infinitos. La tercera vez tiene lugar gracias a la geometría de politopos desarrollada por D. Coxeter, entre los años 1930 y 1970.



los fractales y, de manera puntual a las transformaciones realizadas por y en fractales, es indispensable tener en cuenta los antecedentes de Dedekind, Zermelo y Gödel.

El conjunto de Zermelo se expresa en los siguientes términos: $\{\{\{\dots\}\}\}$

O, lo que es equivalente, así: $\{f(x) \mid x \in A\}$

Como es sabido, la diagonal, de la serie 'm' y 'w' muestra la distribución creciente y por tanto la transformación del conjunto en las variaciones $E0$, etc.

El conjunto de Gödel, por su parte, se expresa en los siguientes términos: $\{x \mid Phi(x)\}$

Ahora, si se considera un damero, esto es, un plano dividido en casillas se aprecia transformaciones consistentes en traslación, rotación, dilatación e inversión. Es exactamente lo que acontece con una transformación de Möbius.

En cualquier caso, lo que resulta claro a la luz de lo que precede es que el tema fundamental es el espacio, lejos de ser una entidad sólida y rígida, implica, permite, admite transformaciones. Pues bien, la idea que quiero sostener es que las transformaciones del espacio que son, de base, el tema de la geometría, permiten de una manera gradual, si cabe, un desplazamiento de estructuras, formas y sistemas eminentemente lineales hacia dinámicas no-lineales. Este es el tema central de la siguiente sección. Pero antes puntualicemos: las iteraciones de Zermelo, Peano, Dedekind y Cantor son iteraciones fractales lineales y sus resultados son igualmente lineales. Pero algo distinto sucede con Mandelbrot.

4.3. Patrones y discreción

El motivo que gatilla en la historia de la geometría el trabajo con la elaboración de patrones y que al cabo conducirá al descubrimiento de la iteración fractal, tiene que ver con la discusiones generadas en torno al quinto postulado de Euclides, en contraste con la aceptación de los primeros cuatro postulados de los *Elementos*.

Específicamente, la dificultad se encuentra en el hecho de que Euclides plantea las definiciones y los axiomas de la geometría clásica como hechos consumados y sin continuidad entre una dimensión y otra. Sencillamente, es imposible que una línea recta coincida con un plano, o que un plano sea congruente con un sólido, por ejemplo. De manera taxativa: el punto carece de dimensiones, la línea recta es la dimensión uno, el plano es la dimensión dos, el sólido es dimensión tres. Cada dimensión es una estructura lógica y ontológica propia y suficiente.

Con seguridad, la primera transformación radical de los espacios de Euclides es la que llevan a cabo los conjuntos de Peano, que permite ver cómo acontece la transformación de la dimensión uno, en términos euclidianos, en dimensión dos, hasta llenar o convertirse una línea recta en un plano:

Es el momento para formular lo que puede ser considerado como una sub-tesis, relativa al pro-



blema formulado al comienzo. En contraste con lo que precede, de acuerdo con la idea del mismo Mandelbrot, es que los fractales trabajan, abierta o tácitamente, sobre sistemas continuos, natura non facit saltus; quiero sostener que los sistemas, fenómenos y comportamientos complejos tienen en su base matemáticas discretas. Mejor aún, los sistemas complejos son fenómenos discretos. Sus componentes más destacados pueden ser claramente identificados: conjuntos parcialmente ordenados, conjuntos extremos, geometría discreta y combinatoria, teoría de probabilidades discreta, problemas combinatorios (complejidad combinatoria), teoría de juegos y teoría de la decisión racional, topología, algunas de las lógicas no clásicas y las matemáticas de los sistemas computacionales. La geometría de fractales, contra la interpretación de su propio descubridor, no trata de sistemas continuos, sino de sistemas discretos⁷.

De manera sintomática, pensar en términos de fenómenos, sistemas y dinámicas discretas equivale a pensar en términos de armonía. El estudio de invariancia/simetría se revela como fuente profunda de una armonía común a muchas estructuras. El descubrimiento de la geometría de fractales, por parte de Mandelbrot, ha arrojado nuevas y sugerentes luces en campos diversos como las matemáticas, las finanzas, las ciencias en general, el arte y, de manera puntual, en antropología y arqueología [13].

En efecto, contra el encerramiento del mundo, en términos de patrones y criterios occidentales a partir de los postulados de Euclides, el encuentro de los fractales (notablemente fractales escálantes, multifractales, etc.), puso de manifiesto, con toda claridad, la ubicuidad de la aspereza. En palabras de Mandelbrot: “In one field after another, fractal geometry became the first tool which made it possible to help shape a theory of roughness” [14]. Y más adelante:

Roughness is ubiquitous in Nature. In the works of Man, it may not be welcome, but is not always avoided, and may sometimes be unavoidable. Examples are found in some parts of mathematics, where they were at one time described as ‘pathological’ or ‘monstruous’... [14].

En otras palabras, la geometría de fractales pone de manifiesto que la aspereza en la naturaleza es, paradójicamente cuando se lo observa desde los ojos de la tradición euclidiana, el resultado mismo de la armonía. Pues bien, como es sabido, la aspereza fractal coincide exactamente con, o se funda en, la dimensión fractal.

5. Iteración fractal como transformación de la linealidad

La transformación del espacio operada por los fractales es la iteración. Iteraciones, en rigor. Radicalmente, las operaciones de traslación, reflexión y rotación no alteran absolutamente para nada

⁷Una observación larga se impone aquí en el espíritu de la filosofía de la ciencia. En fractales, sostengo, sucede algo análogo a lo que vemos con la teoría de la evolución. Darwin interpreta su teoría en términos gradualistas, y Darwin mismo es gradualista a pesar suyo y a pesar de su propia teoría. M. Ruse ha llamado fuertemente la atención en distintos libros sobre este hecho (por ejemplo, *The evolution wars: a guide to the debates* (2003), *Darwin and Design: Does evolution have a purpose?* (2003), *The Evolution-Creation Struggle* (2005), *Darwinism and its Discontents* (2006)). Más radicalmente, S. J. Gould ha puesto suficientemente de manifiesto que la teoría de la evolución es catastrofista y que Darwin termina siendo gradualista por motivos extra-científicos, a saber: por el peso de la Inglaterra Victoriana.

la linealidad. Otro tanto puede y debe decirse las operaciones llevadas a cabo en y por la topología: torcer, estirar y comprimir, no alteran significativamente la linealidad de un sistema o fenómeno determinados. Las transformaciones operadas en la geometría euclidiana tanto como en la topología corresponden a un pensamiento y ontología de sistemas continuos.

En contraste, las iteraciones fractales corresponden a una ontología discreta y tanto exigen como ponen de manifiesto un modo de pensar específico: pensar en sistemas discretos. Precisamente por ello emergen la aspereza y la armonía. La belleza del universo se naturaliza de manera evidente.

En la base misma de los fractales se encuentra la famosa ecuación: $f(z) = z^2 + c$

Pues bien, la ecuación productora de fractales consiste exactamente en una iteración mediante la cual accedemos a una noción novedosa en la historia de la geometría, a saber: la idea de equilibrios dinámicos o, lo que es equivalente, la noción de simetrías dinámicas. Sin lugar a duda, el papel cultural, además de científico, del computador, desempeña un rol protagónico, que permite marcar una distancia enorme con respecto a la existencia y desarrollo de patrones e iteraciones, notablemente, en el arte precolombino, desde los Aztecas hasta los Incas, pasando por los Mayas y los Muiscas, por ejemplo. H. Pagels [15] llamó en su momento la atención acerca del papel del computador en el desarrollo de las ciencias de la complejidad y, por extensión, en relación con la forma de pensar qué es la complejidad.

Mandelbrot permaneció casi toda su vida con la preocupación acerca de: a) las deudas con el pasado y b) la novedad que representaban sus propios desarrollos. A los mencionados capítulos históricos de geometría fractal de la naturaleza es indispensable agregar un amplio volumen, compuesto en su mayoría por artículos publicados en prestigiosas revistas. En 2004 afirma sucintamente: “The most important results, due to the author, consist in extensions of the Fatou-Julia theory” [14].

Mandelbrot no hizo referencia en ningún lugar de su obra expresamente a las relaciones entre fractalidad y complejidad, pero sí entre fractalidad y caos. Mi propósito aquí consiste en señalar de manera expresa, incluso contra Mandelbrot mismo, que la geometría de fractales es un modo propio de las ciencias de la complejidad y que las iteraciones fractales son operaciones mediante las cuales lo no-complejo puede ser transformado en complejidad creciente; al cabo, complejidad no-lineal, complejidad emergente, complejidad creciente, etc.

La ecuación que expresa la transformación no-lineal de un fenómeno lineal es, por tanto, la misma ecuación que produce fractalidad, válida igualmente para sistemas multifractales. Una manera en ciencia, en general, de introducir una novedad consiste en extender un modelo determinado, pre-existente.

... Every reader of mystery novels recalls many cases in which the sequence of the visits of a suspect to a house looks complex, but the sequence of the suspect's displacements about town obeys simple rules. Therefore, it is not totally surprising that when one is faced with phenomena restricted to the line, a frequently effective way to simplify consists in interpreting them as the trace left upon the line by the corresponding phenomena residing in the plane. Using again the peculiar vocabulary of mathematicians, many mathematical theories can be simplified by being “complexified” by which a real number x is changed to a complex number z [14].

Sorprendentemente, Mandelbrot [14] desarrolla la ecuación generadora de fractalidad⁸ pero no llega a interpretarla como transformación de la linealidad en no-linealidad, o de lo no-complejo en complejo. Huelga decir que un número complejo no tiene la misma acepción de un fenómeno de complejidad creciente en sentido estricto.

6. Metodología

Como se aprecia, este artículo se sitúa en el centro del trabajo con las ciencias de la complejidad, es una investigación eminentemente teórica y abarca uno de los más difíciles problemas en complejidad, sobre el cual, paradójicamente, no existe prácticamente ningún trabajo en el mundo, a saber: estudiar si, y si sí, cómo, es posible la transformación de un sistema no-complejo en uno complejo. Este artículo ha sostenido que es posible y cómo lo es. El énfasis aquí ha sido al mismo tiempo histórico y heurístico.

Luego de un trabajo sobre el estado del arte y sobre las principales fuentes de trabajo en sistemas no-lineales, el artículo ha identificado en los fractales, a partir de los trabajos de B. Mandelbrot, la condición más idónea para estudiar y resolver problema identificado. Al fin y al cabo, uno de los ejes y acaso el más importante, en el trabajo de los complejólogos consiste en complejizar los fenómenos. Eso es, de manera central, lograr que ganen grados de libertad.

La iteración fractal, una transformación habitual en topología, y acaso el fundamento mismo de las estructuras fractales, caracterizadas por autosimilitud, sostiene el artículo, es la forma más expedita de transformación de un fenómeno no-complejo a uno complejo. Por tanto, cabe decir en propiedad, a un fenómeno fractal. A fin de estudiar cómo acontece se ha tomado la ecuación generadora de fractales.

Sobre la base de haber ilustrado en qué consisten los patrones y los fenómenos de discreción, se logra demostrar la muy fuerte relación entre complejidad, no-linealidad y fractalidad. En síntesis, la metodología, para el núcleo duro del problema considerado ha sido una combinación de lógica y matemáticas, muy específicamente, de sistemas discretos.

7. Conclusiones

El descubrimiento de los patrones no es exclusivo de la geometría de fractales, sino, se inicia, como he querido mostrarlo, de manera puntual con Peano. Sin embargo, la geometría de fractales nos permite resolver el segundo de los dos problemas fundamentales de los sistemas complejos: la transformación de la linealidad en no-linealidad o también de la no-complejidad en complejidad.

⁸Una observación puntual pero importante se impone: no por ser caotólogo se es complejólogo, así como no por ser paraconsistentista se es complejólogo, por ejemplo. Pues bien, exactamente en este mismo sentido, no por trabajar fractales se trabaja necesariamente en complejidad. Pero, por el contrario, cuando se trabaja en complejidad sí se atraviesa o se puede atravesar por caos, fractales, termodinámica del no-equilibrio y demás ciencias de la complejidad. En otras palabras, sencillamente, y a título general: existen descubrimientos en la historia de la ciencia de los cuales sus propios autores no han sido conscientes. Los ejemplos abundan desde la física hasta las matemáticas, desde la biología hasta la sociología, por ejemplo.



La puerta es clara y la clave, no admite dudas: se trata de la iteración fractal. Las iteraciones fractales son transformaciones mediante las cuales los sistemas/nosotros ganan/ganamos grados de libertad. La deuda inmediata es con la geometría de fractales, un fenómeno sobre el cual el propio Mandelbrot parece no haber caído en la cuenta⁹.

8. Coda

El descubrimiento de la transformación fractal de la linealidad en no-linealidad sufre una situación análoga a lo que, en otro plano y contexto pusiera de manifiesto A. Axelrod con respecto a la solución al Dilema del prisionero: la cooperación puede ser alcanzada gracias a juegos iterativos. Esto es, sencillamente: debido a que debemos jugar un mismo juego a largo plazo, la mejor alternativa que hay/que queda es la cooperación. Axelrod logra demostrar esta idea justamente gracias a simulaciones de juegos iterativos [16].

No en vano la teoría de juegos es uno de los elementos constitutivos de las matemáticas de sistemas discretos. Pues bien, la transformación de la linealidad en no-linealidad consiste en la transformación de un universo continuo a una comprensión discreta de la realidad. Las consecuencias de esta idea no son pocas y, sin embargo, permanecen apenas esbozadas en la historia de la ciencia en general y de las matemáticas y la geometría en particular.

Agradecimientos

Quiero agradecer, de un lado a la editora invitada de la revista por la calidad de los evaluadores que obtuvo para mi artículo y, de otra parte, al mismo tiempo quiero agradecer a los evaluadores. En particular, uno de ellos me ayudó a comprender mayor mi propio problema y mi propia tesis. Según ese concepto, una iteración lineal siempre produce un resultado lineal. Tiene absolutamente toda la razón. Pero olvida que una iteración fractal o bien admite, o bien implica no-linealidad. Es, particularmente, el caso con los fractales de Mandelbrot. Ciertamente que el caso de Peano o de Möbius no sean del caso. Pero como se desprende del marco de mi artículo, el énfasis se sitúa en la obra de Mandelbrot y sus deudas y distancias notablemente con G. Julia y P. Fatou.

Referencias

- [1] S. Kauffman, *Investigations*. Oxford, Oxford University Press, 2000.
- [2] C. E. Maldonado, *Termodinámica y complejidad. Una introducción para las ciencias sociales*. Bogotá, D.C. Desde Abajo [primera edición 2005], Ed. Universidad Externado de Colombia, 2011.
- [3] C. E. Maldonado, "Ciencias de la complejidad: Ciencias de los cambios súbitos", *Odeón. Observatorio de Economía y Operaciones Numéricas*, Universidad Externado de Colombia, 2005, pp. 85-125.
- [4] D. Campos, "Caos y complejidad en el marco de cuatro revoluciones científicas", Maldonado, C. E. (Ed.), *Complejidad: revolución científica y teoría*, Bogotá, D.C., Ed. Universidad del Rosario, 2009, págs. 21-33.

⁹A título especulativo, creo que la razón por la cual Mandelbrot no se percató de la transformación fractal de la linealidad en no-linealidad tiene que ver con su asunción de que los fractales, y por derivación la complejidad, trata de sistemas continuos, cuando, en realidad, ponen de manifiesto que vivimos en un universo esencialmente probabilístico, no-ergódico y discreto. En otro trabajo aparte en curso me ocupo de este último problema, es decir: del carácter discreto del mundo, en unión con la no-ergodicidad y la contingencia.



- [5] A. C. Scott, *The Nonlinear Universe. Chaos, Emergence, Life*. Springer Verlag, 2007.
- [6] E. Tiezzi, *La belleza y la ciencia. Hacia una visión integradora de la naturaleza*. Barcelona, Icaria, 2006.
- [7] D. Zahavi, "Beyond Empathy: Phenomenological Approaches to Intersubjectivity". *Journal of Consciousness Studies*, 8, 2001, pp. 151-167.
- [8] L. Mlodinow, Euclid's Window. *The Story of Geometry from Parallel Lines to Hyperspace*. New York, The Free Press, 2001.
- [9] P. Bak, *How Nature Works. The New Science of Self-organized Criticality*. Copernicus, 1996
- [10] B. Mandelbrot, *La geometría fractal de la naturaleza*. Barcelona, Tusquets, 1997.
- [11] G. Bateson, *Espíritu y naturaleza*. Buenos Aires: Amorrortu, 2004.
- [12] C. A. Pickover, *La banda de Möbius. Todo sobre la maravillosa banda del Dr. Möbius: matemáticas, juegos, literatura, arte, tecnología y cosmología*. Almuzara, 2009.
- [13] F. López Aguilar y F. Brambila Paz, (Eds.). *Antropología fractal*. México, Sociedad Matemática Mexicana, 2007.
- [14] B. Mandelbrot, *Fractals and Chaos. The Mandelbrot Set and Beyond*. Springer Verlag (with a Foreword by P. W. Jones and texts co-authored by C. J. G. Evertz and M. C. Gutzwiller), 2004.
- [15] H. Pagels, *Los sueños de la razón. El ordenador y los nuevos horizontes de las ciencias de la complejidad*. Barcelona, Gedisa, 1991.
- [16] R. Axelrod, *The Complexity of Cooperation. Agent-Based Models of Competition and Collaboration*. Princeton, NJ, Princeton University Press, 1997.
- [17] T. Todorov, *La conquête de l'Amérique. La question de l'autre*, Paris, Seuil, 1982.
- [18] B. Greene, *El universo elegante: Supercuerdas, dimensiones ocultas y la búsqueda de una teoría final*, Barcelona, Crítica, 2001
- [19] Mandelbrot, B., (1997). *La geometría fractal de la naturaleza*. Barcelona: Tusquets, pág. 586.

Carlos Eduardo Maldonado.

Ph.D. en Filosofía por la KULeuven (Bélgica), post-doctorado como Visiting Scholar en la Universidad de Pittsburgh (EE.UU); postdoctorado como Visiting Research Professor en la Catholic University of America (Washington, D.C.), Academic Visitor, Facultad de Filosofía, Universidad de Cambridge (Inglaterra); profesor titular, Facultad de Ciencia Política y Gobierno, Universidad del Rosario; ha sido reconocido con la "Distinción al Mérito", por la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú, por sus contribuciones a la filosofía y a la complejidad (2008); premio Portafolio, Mención de Honor Categoría Mejor Docente (2008); "Profesor Distinguido", título conferido por la Universidad del Rosario (2009); Investigador Senior (Colciencias); Senior Member-IEEE. Doctor Honoris causa, Universidad de Timisoara (Rumania), 2015.

Instrucciones para los Autores

Introducción

La revista INGENIERÍA es una publicación periódica-científica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Tiene como propósito principal divulgar los resultados de investigación de la comunidad académica de la Facultad del país y del exterior. Por tal motivo, los artículos que se publican en la revista deben tener relación con el trabajo en ingeniería, en general, y con las derivaciones de la ingeniería que se desarrollan en la Universidad, en particular. Su frecuencia es cuatrimestral (tres ediciones por año). Todo artículo es evaluado de manera doble-ciega por pares revisores antes de ser calificado como candidato para publicar. El Comité Editorial, tomando en cuenta los conceptos emitidos por los evaluadores y el cumplimiento de las políticas editoriales de la Revista, decide la publicación del artículo en una edición futura. Todos los artículos presentados a la revista INGENIERÍA deben ser inéditos. No se publicarán artículos que hayan sido anteriormente publicados o que hubieren sido sometidos por el autor o los autores a otros medios de difusión nacional o internacional para su publicación.

Clasificación de los artículos

La clasificación de los artículos dentro de la revista INGENIERÍA se hace de acuerdo con la categorización sugerida por el Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología y e Innovación COLCIENCIAS, para revistas científicas y tecnológicas indexadas. Los autores deben definir y comunicar en la carta de presentación y en la plantilla del artículo la categoría del mismo. Las categorías de los artículos están identificadas por el número de orden de la siguiente lista y sus características son:

1. Artículo de investigación científica y tecnológica: Documento que presenta, de manera detallada, los resultados originales de proyectos de investigación. La estructura generalmente utilizada contiene cuatro apartes importantes: introducción, metodología, resultados y conclusiones.
2. Artículo de reflexión: Documento que presenta resultados de investigación desde una perspectiva analítica, interpretativa o crítica del autor, sobre un tema específico, recurriendo a fuentes originales.
3. Artículo de revisión: Documento resultado de una investigación donde se analizan, sistematizan e integran resultados de investigaciones publicadas o no publicadas, sobre un campo en ciencia o tecnología, con el fin de dar cuenta de los avances y las tendencias de desarrollo. Se caracteriza por presentar una cuidadosa revisión bibliográfica de por lo menos 50 referencias.
4. Artículo cortó: Documento breve que presenta resultados originales preliminares o parciales de una investigación científica o tecnológica, que por lo general requieren de una pronta difusión.
5. Reporte de caso: Documento que presenta los resultados de un estudio sobre una situación particular con el fin de dar a conocer las experiencias técnicas y metodológicas consideradas en un caso específico. Incluye una revisión sistemática comentada de la literatura sobre casos análogos.

6. Revisión de tema: Documento resultado de la revisión crítica de la literatura sobre un tema en particular.

La Revista INGENIERÍA dará prelación a aquellos documentos que se clasificarían en los artículos tipo 1, 2 ó 3.

Procedimiento para el envío de artículos para publicación

Los autores deberán enviar al Editor los siguientes documentos mediante la plataforma Open Journal System (OJS) de la Revista:

- Carta de presentación y originalidad del artículo: El formato de la presente carta puede descargarse en el siguiente enlace:
<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reving/pages/view/Formatos>.
La finalidad de la carta es certificar que el artículo es inédito, que no está sometido a otra publicación y que se aceptan las normas de publicación de la Revista.
- El artículo en formato digital utilizando la plantilla y las normas de presentación que se pueden consultar en el siguiente enlace (instrucciones a los autores):
<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reving/pages/view/Instructivos>.
Los autores relacionarán en el correo de postulación del artículo dos posibles evaluadores que cumplan las siguientes condiciones:
 - Debe tener al menos título de maestría
 - Pertenecer a una institución diferente a la de los autores
 - Haber realizado publicaciones en los últimos tres años



Nota: Enviar los datos de los contactos de los posibles evaluadores (nombre completo, institución y correo electrónico). Esta información también puede ser enviada a la siguiente dirección electrónica revista_ing@udistrital.edu.co

- En caso de ser aceptado, los autores del artículo se comprometen a diligenciar el formato de cesión de derechos para publicación. Se puede descargar en el siguiente enlace:
<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reving/pages/view/Formatos>

Se puede consultar la guía rápida para autores en la plataforma OJS en el enlace:
<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reving/article/view/5540/7070>

Aspectos a tener en cuenta

- Se considera un artículo largo cuando tiene más de diez (10) páginas con este formato. Por consiguiente se recomienda tener como límite diez (10) páginas para la elaboración de un artículo. El Comité Editorial podría solicitar a los autores reducir el tamaño del artículo cuando lo considere demasiado largo.
- Los resultados de las evaluaciones de los pares árbitros y las modificaciones que requiera el Comité Editorial serán notificados a los autores a través de la plataforma OJS y al correo electrónico del autor de correspondencia. Los autores deberán enviar nuevamente los artículos con las modificaciones sugeridas sin nombres y sin biografías. En general, este intercambio de sugerencias y modificaciones puede llegar a presentarse una o dos veces después de presentar el artículo.

- 
- 
- Cuando un artículo no cumple con las condiciones definidas para la revista, el Comité Editorial podría decidir no publicarlo. En este caso, el autor o los autores serán notificados de la decisión.

DERECHOS DE AUTOR

El contenido completo de la licencia Creative Commons, bajo la cual se resguardan los derechos de autor de aquellos que publican en la Revista Ingeniería, puede consultarse en: Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License.

