

Modelos y aplicaciones en ingeniería para el desarrollo social y tecnológico



Barrios Arlante, Juan José

Modelos y aplicaciones en ingeniería para el desarrollo social y tecnológico / Juan José Barrios Arlante [y otros quince autores]. -- Bucaramanga (Colombia) : Universidad Santo Tomás, 2020.

178 páginas: ilustraciones y cuadros a color. -- (Colección Contribuciones de Investigación; 6).

Incluye referencias bibliográficas al final de cada capítulo

ISBN: 978-958-8477-84-8 (En línea)

Contenido: Modelos tridimensionales de realidad virtual, de objetos arqueológicos del periodo histórico Guane temprano. – Implementación de un filtro analógico selectivo en frecuencia con parámetros variantes en el tiempo. – Control de posición automático de un cuadrucóptero como soporte en labores de monitorización, exploración y búsqueda. – Calidad en tratamientos de ortodoncia en Clínicas Universidad Santo Tomás, según métricas Lean Six Sigma. – Modelo de regresión de respuesta cualitativa costos de transacción en la comercialización de la mora. – Modelo matemático para la atención de desastres, inundación y remoción de masa en Bucaramanga. – Percepción de los estudiantes frente a las TIC, TAC y TEP para la enseñanza de Ciencias Sociales.

1. Ingeniería industrial 2. Automatización 3. Control de calidad 4. Biotecnología agrícola 5. Tecnología educativa 6. Realidad virtual I. Contreras Pico, Carlos Ricardo II. Meneses Fonseca, Jaime Enrique III. Castro Jaluba, William Razvan IV. González Quेरubín, Edwin Alonso V. Carreño Zagarra, José Jorge VI. Ospina Henao, Paolo Andrés VII. Delgado Moreno, Frank VIII. Torres Murillo, Ethman Ariel IX. Rueda Forero, Pascual X. Álzate Marín, José Joaquín XI. Aguilar Imitola, Karin Julieth XII. Martínez Quezada, Daniel Orlando XIII. Díaz Contreras, Gustavo Adolfo XIV. Flórez Ordóñez, Yudy Natalia XV. Navas Gómez, Tatiana Inés. XVI. Universidad Santo Tomás. Dirección de Investigación e Innovación XVII. Serie XVIII. Título.

620.007 SDD 23

CO-BuUST

Centro de Recursos para el Aprendizaje y la Investigación CRAI, Universidad Santo Tomás, Bucaramanga.

Directivos

Universidad Santo Tomás Seccional Bucaramanga

Fray Oscar Eduardo GUAYÁN PERDOMO, O.P.

Rector Seccional

Fray Mauricio GALEANO ROJAS, O.P.

Vicerrector Académico

Fray Rubén Darío LÓPEZ GARCÍA, O.P.

Vicerrector Administrativo y Financiero

ISBN: 978-958-8477-84-8 (En línea)

Edición

© Universidad Santo Tomás
Bucaramanga, Colombia
2020

Libro

Modelos y aplicaciones en ingeniería para el
desarrollo social y tecnológico

Autores

Varios

Compilador

Dirección de Investigación e Innovación

Dirección de Investigación e Innovación

PhD Yudy Natalia Flórez Ordóñez

Directora

Hilda Luz González Cabanzo

Ingeniera de Soporte

Departamento de Publicaciones

C.P. Freddy Luis Guerrero Patarroyo

Director

Diseño y producción gráfica

Centro de Diseño e Imagen Institucional - CEDII

Dis. Graf. Olga Lucía Solano Avellaneda

Directora

C.S. María Amalia García Núñez

Corrección de Estilo

M.P. Luis Alberto Barbosa Jaime

Diseño y diagramación

© Derechos reservados

Universidad Santo Tomás

Seccional Bucaramanga, Colombia

Carrera 18 No. 9 - 27

PBX: (+57) 607 698 5858

CONTENIDO

Contenido

Prólogo	11
----------------------	-----------

Modelos tridimensionales de realidad virtual, de objetos arqueológicos del periodo histórico Guane temprano	17
--	-----------

Juan José Barrios Arlante, Carlos Ricardo Contreras Pico, Jaime Enrique Meneses Fonseca

Implementación de un filtro analógico selectivo en frecuencia con parámetros variantes en el tiempo.....	35
---	-----------

William Razvan Castro Jaluba, Carlos Ricardo Contreras Pico

Control de posición automático de un cuadrucóptero como soporte en labores de monitorización, exploración y búsqueda	63
---	-----------

Edwin Alonso González Querubín, José Jorge Carreño Zagarra, Paolo Andrés Ospina Henao

Calidad en tratamientos de ortodoncia en Clínicas Universidad Santo Tomás, según métricas Lean Six Sigma	81
---	-----------

Frank Delgado Moreno, Ethman Ariel Torres Murillo

Modelo de regresión de respuesta cualitativa, costos de transacción en la comercialización de la mora..... 99

Pascual Rueda Forero, José Joaquín Alzate Marín

Modelo matemático para la atención de desastres, inundación y remoción de masa en Bucaramanga 125

Karin Julieth Aguilar Imitola, Daniel Orlando Martínez Quezada

Percepción de los estudiantes frente a las TIC, TAC y TEP para la enseñanza de Ciencias Sociales..... 153

Gustavo Adolfo Díaz Contreras, Yudy Natalia Flórez Ordóñez Tatiana Inés Navas Gómez

Lista de figuras

Figura 1. Modelo 3D en realidad virtual de la cabeza de Miguel Ángel	19
Figura 2. Sistema optoelectrónico implementado.....	21
Figura 3. Objeto periodo Guane temprano, copa.....	22
Figura 4. Montaje experimental del sistema HP 3D Scan	23
Figura 5. (a) Calibración del sistema según el tamaño del objeto. (b) Deformación de las franjas debido a la topografía del objeto arqueológico.....	24
Figura 6. (a) Nube de puntos del objeto. (b) Digitalización 3d del objeto	25
Figura 7. (a) Objeto por digitalizar. (b) Nube de puntos.....	26
Figura 8. (a) Digitalización 3D. (b) Visualización en sketchfab de la imagen 3D	27
Figura 9. Interacción 3D con el modelo digitalizado en la figura 8.....	27
Figura 10. Objeto por digitalizar ustcl28	28
Figura 11. Nube de puntos del objeto mostrado en la figura 10.....	28
Figura 12. Modelo 3D del objeto mostrado en la fig. 7	29
Figura 13. Interacción 3D con el modelo digitalizado en la fig. 8	29
Figura 14. Visualización en sketchfab del modelo 3d mostrado en la figura 9	30
Figura 15. Respuesta escalón para diferentes valores de factor de amortiguamiento.....	39
Figura 16. Respuesta escalón para diferentes valores de frecuencia natural no amortiguada	39
Figura 17. Diagrama de bloques sistema variador.....	41
Figura 18. Respuesta escalón sistema variador	41
Figura 19. Respuesta sistema variador ante señal cuadrada	42
Figura 20. Diagrama de bloques filtros LTI y LTV	42
Figura 21. Comparación respuesta escalón filtros LTI y LTV.....	43
Figura 22. Diagrama de bloques detector variaciones tipo escalón.....	43
Figura 23. Generador señal de disparo	44
Figura 24. Señal de disparo ante señal con ruido	44

Figura 25. Salida filtro con retardo de 0.5 sg	45
Figura 26. Salida filtro con retardo de 2.5 sg	45
Figura 27. Diagrama de bloques comparación filtros LTI-LTV	46
Figura 28. Comparación filtros LTI-LTV con respecto a la entrada.....	46
Figura 29. Tarjeta de desarrollo Quad Apex	47
Figura 30. Implementación circuito disparador.....	49
Figura 31. Simulación en AD2 del circuito disparador.....	50
Figura 32. Señal de disparo real en osciloscopio.....	51
Figura 33. Implementación circuito variador	51
Figura 34. Simulación en AD2 del circuito variador	52
Figura 35. Salida variador real en osciloscopio.....	52
Figura 36. Implementación circuito disparador-variador.....	53
Figura 37. Simulación en AD2 circuito disparador-variador.....	54
Figura 38. Salida real circuito disparador-variador en osciloscopio	54
Figura 39. Implementación filtro LTI.....	55
Figura 40. Simulación en AD2 filtro LTI.....	55
Figura 41. Salida real filtro LTI en osciloscopio	55
Figura 42. A. Primera sección filtro LTV. B. Segunda sección filtro LTV	56
Figura 43. Simulación en AD2 salida filtro LTV	57
Figura 44. Salida real filtro LTV en osciloscopio.....	57
Figura 45. Comparación filtros LTI-LTV en osciloscopio.....	57
Figura 46. Helicóptero desarrollado por George de Bothezat e Iván Jerome.....	65
Figura 47. Descripción del movimiento de un cuadricóptero.....	67
Figura 48. Esquema de control predictivo basado en modelo	72
Figura 49. Seguimiento de referencias de la aeronave en ausencia de perturbaciones (la señal roja es la referencia mientras la azul es la señal medida)	76
Figura 50. Seguimiento de referencias de la aeronave en presencia de perturbaciones (la señal roja es la referencia mientras la azul es la señal medida)	76
Figura 51. Determinación de los niveles sigma para alineación	88

Figura 52. Determinación de los niveles sigma para rebordes marginales	88
Figura 53. Determinación de los niveles sigma para inclinación bucolingual	89
Figura 54. Determinación de los niveles sigma para contactos oclusales	89
Figura 55. Determinación de los niveles sigma para relación oclusal.....	90
Figura 56. Determinación de los niveles sigma para Overjet	91
Figura 57. Determinación de los niveles sigma para contactos interproximales	91
Figura 58. Determinación de los niveles sigma para angulación de la raíz	92
Figura 59. La función logística	107
Figura 60. Esquema de contratación simple	114
Figura 61. Municipios del área metropolitana de Bucaramanga.....	130
Figura 62. Geolocalización de los albergues en cada municipio del AMB.....	134
Figura 63. Geolocalización de polígonos por manzana censal en el AMB.....	135
Figura 64. Geolocalización de zonas de riesgo por inundación y remoción en masa del AMB.....	136
Figura 65. Esquema de un problema con un único centro de distribución	138
Figura 66. Esquema de un problema con varios centros de distribución.....	141
Figura 67. Modelo ITEAVI.....	160
Figura 68. Percepción global de indicadores por edad posgrado.....	169
Figura 69. Percepción global de indicadores por edad pregrado.....	170

Listas de tablas

Tabla 1. Recursos utilizados en la implementación del filtro LTI	58
Tabla 2. Recursos utilizados en la implementación del filtro LTV	58
Tabla 3. Asociación de los niveles sigma con desempeño competitivo de las empresas.....	85
Tabla 4. Valoración del coeficiente Kappa	86
Tabla 5. Exactitud y la precisión del sistema: inspector - modelo - gage molar por medio de un estudio Gage R&R para atributos	87
Tabla 6. Resultados de los niveles sigma de las características del OGS	92
Tabla 7. Resumen para hallar porcentaje de correctos.....	105
Tabla 8. Variables incluidas en la comercialización de la mora.....	116
Tabla 9. Modelo Logit.....	119
Tabla 10. De clasificación	119
Tabla 11. Variables específicas	120
Tabla 12. Clasificación	120
Tabla 13. Información demográfica de los municipios que conforman el AMB	130
Tabla 14. Cálculo de la capacidad para albergar personas de una instalación ...	132
Tabla 15. Resumen de capacidad instalada de albergues por tipo y municipio ..	134
Tabla 16. Resumen de cantidad de albergues por tipo y municipio.....	135
Tabla 17. Notación utilizada en la formulación matemática.....	139
Tabla 18. Comparativo de pregrado y posgrado.....	161
Tabla 19. Percepción de disfrute posgrado	161
Tabla 20. Percepción de disfrute pregrado	162
Tabla 21. Percepción frente al soporte técnico posgrado.....	162
Tabla 22. Percepción frente al soporte técnico pregrado.....	163
Tabla 23. Percepción de aprendizaje posgrado	165
Tabla 24. Percepción de aprendizaje pregrado.....	166
Tabla 25. Percepción de esfuerzo posgrado	167
Tabla 26. Percepción de esfuerzo pregrado	168

Tabla 27. Distribución por edad y género posgrado.....	169
Tabla 28. Distribución por edad y género pregrado.....	169
Tabla 29. Porcentaje de estudiantes de posgrado por edades que han estudiado con aulas virtuales.....	170
Tabla 30. Porcentaje de estudiantes de posgrado por edades que han realizado cursos por internet	171
Tabla 31. Porcentaje de estudiantes de pregrado por edades que han estudiado con aulas virtuales.....	171
Tabla 32. Porcentaje de estudiantes de pregrado por edades que han realizado cursos por internet	171

PRÓLOGO

Prólogo

Desde su concepción la ingeniería ha jugado un rol significativo en el desarrollo de la sociedad, se define como un “enfoque sistemático e iterativo para diseñar objetos, procesos y sistemas con el propósito de satisfacer las necesidades humanas”, los ingenieros aplican conocimientos científicos y matemáticos para la solución de problemas o alcanzar metas. Los productos de la investigación científica desde la ingeniería suelen ser la base para la toma de decisiones en temas de interés con repercusiones económicas, sociales, ambientales, entre otras; estos resultados reflejan la interrelación entre la tecnología, la ingeniería y la sociedad, y su evolución conjunta.

Como consecuencia de esta cohesión, la ingeniería afecta prácticamente todos los aspectos de nuestra sociedad y busca impactar en su desarrollo diferentes variables, como el tecnológico y el social. El término tecnología suele asociarse a ordenadores, microchips, inteligencia artificial; sin embargo, Peter Drucker menciona que “la tecnología no se trata de herramientas, se trata de cómo trabajan los humanos”. Desde el uso de artefactos simples (piedras afiladas amarradas a troncos usados como lanzas por nuestros ancestros primitivos) hasta el desarrollo de métodos sofisticados para la solución de un problema (como el escaneo de objetos en 3D), la tecnología implica un cambio en el mundo natural para gene-

rar un beneficio. En este sentido, el desarrollo tecnológico es entendido como el avance en la generación de técnicas, habilidades, métodos o procesos usados en el desarrollo de bienes y servicios.

La ingeniería pocas veces es pensada como una actividad social; pero lo es, de hecho, las necesidades y presiones sociales enmarcan el papel de los ingenieros, y cómo moldean los contextos en la sociedad. De acuerdo con Banco Mundial, el desarrollo social se centra en la necesidad de “poner en primer lugar las personas” para el proceso de desarrollo, es por esto que busca atacar problemas, como la pobreza, vulnerabilidad, exclusión, corrupción y violencia.

En este contexto, el volumen se titula *Ingeniería para el desarrollo social y tecnológico*. El cual busca difundir los resultados de investigaciones participantes en la X y XI Convocatoria de Investigación Interna de la Universidad Santo Tomás Seccional Bucaramanga. Los trabajos reunidos aquí se encuentran en áreas del conocimiento, como: estadística, optimización, modelado matemático, simulación, gestión de calidad, desarrollos 3D, entre otros; buscando en todos los proyectos presentados un aporte que contribuya a resolver problemas en la sociedad, específicamente, impulsando el desarrollo social y tecnológico. Cada uno de los aportes de investigación presentados en este libro son resumidos a continuación:

Desarrollo tecnológico

La digitalización de objetos 3D ha cobrado gran importancia en aplicaciones industriales, ya que permite representar elementos de configuraciones complejas en un sistema de cómputo, dando la posibilidad de replicar, distribuir o modificar estos en diferentes plataformas, como una impresora 3D, equipos de realidad virtual, entre otros. En el capítulo uno encontramos el trabajo titulado “Modelos tridimensionales de realidad virtual, de objetos arqueológicos del periodo histórico Guane temprano”, el cual representa una aplicación de esta tecnología, este trabajo hizo la digitalización a 360° de observación de los objetos arqueológicos

pertenecientes al periodo histórico Guane temprano y que conforman la Colección Arqueológica Guane, Fray Alonso Ortiz Galeano, O. P., en este trabajo se logró realizar la digitalización de las 24 piezas arqueológicas que se presentan en el repositorio institucional de la Universidad Santo Tomás Seccional Bucaramanga, los resultados de este trabajo contribuyen significativamente a la preservación de elementos históricos, conservando el patrimonio cultural del departamento de Santander y a su vez abre la posibilidad al uso de estos recursos para el desarrollo de actividades de índole económico, como lo es el turismo.

En electrónica se encuentran elementos o partes que intervienen significativamente en el desarrollo de componentes electrónicos, unos de estos elementos son los filtros analógicos, estos permiten el tratamiento de señales, las cuales pueden corresponder a una infinidad de equipos electrónicos de la actualidad. Dada la importancia de los filtros analógicos en el capítulo 2, en el trabajo titulado “Implementación de un filtro analógico selectivo en frecuencia con parámetros variantes en el tiempo”, el cual en la búsqueda por entender y mejorar los filtros analógicos desarrolla una simulación de un filtro LTV y a su vez desarrolla la implementación física de este, comparando los dos escenarios con el fin de validar el entorno simulado.

Los desarrollos tecnológicos en el marco de la industria 4.0 han sido fuertemente influenciados por el uso de aeronaves no tripuladas o drones, teniendo un rol importante en áreas como logística, agro, seguridad, entre otras. Según lo anterior, en el capítulo 3 de esta entrega titulado “Control de posición automático de un cuadricóptero como soporte en labores de monitorización, exploración y búsqueda”, trabajo en el que se obtuvo un modelo matemático multivariable a partir de una perspectiva dinámica que permite describir de manera adecuada su comportamiento a través de un algoritmo de control, que implemente una gran robustez ante incertidumbres de modelado. Este modelo desarrollado es una contribución para el avance en la automatización de estos artefactos en ambientes cada vez más complejos y con una menor intervención humana.

Desarrollo social

La gestión de la calidad facilita el planear, ejecutar y contralar las actividades de una organización, de forma que se cumpla con las expectativas de los clientes; una metodología certificada para investigar la calidad es el Lean Six Sigma, que aplicada al área de la salud busca reducción de la variabilidad, para minimizar o eliminar los defectos o fallas en el servicio a los pacientes. Los autores Torres y Delgado en el capítulo 4, titulado “Calidad en tratamientos de ortodoncia en Clínicas Universidad Santo Tomás, según métricas Lean Six Sigma”, determinan la calidad de los tratamientos de ortodoncia finalizados en el posgrado de Ortodoncia de la Universidad Santo Tomás, utilizando los parámetros Objective Grading System (OGS) de la American Board Orthodontics y métricas de Lean Six Sigma. Encuentran una incongruencia en los resultados obtenidos por la OGS y el Lean Six Sigma, mientras el primero aprueba el número de defectos encontrados, el segundo categoriza los resultados en calidad de incompetencia mundial.

El sector agrícola ha sido fundamental en el desarrollo social y económico del país, finalizando el 2019 el agro se posicionó como el cuarto sector productivo del país; al reconocer su importancia se hace necesario desde la ingeniería incrementar las estrategias que dinamicen la actividad económica y mejoren los niveles de calidad en pro de aumentar el rendimiento para los agricultores y mejorar las condiciones sociales del campo. En el capítulo 5, titulado “Modelo de regresión de respuesta cualitativa, costos de transacción en la comercialización de la mora”, se presenta el aporte de Rueda y Alzate, quienes buscan optimizar los costos de transacción en la comercialización de la mora, con el fin de mejorar la proyección social para los cultivadores del municipio de Piedecuesta (Santander). Contribuyen mediante un modelo de regresión de respuesta cualitativa; dentro de las conclusiones más relevantes identifican el grado de escolaridad, el tipo de contratación, y se observan otras variables relevantes para la caracterización de los costos.

Las condiciones sociales, culturales, económicas y naturales latentes en Colombia la hacen vulnerable ante amenazas, tanto naturales como asociadas con el hombre, las cuales constituyen grandes desafíos frente al desarrollo sostenible del país. El desarrollo social está íntimamente ligado con la vulnerabilidad de la población. Con el propósito de aportar en este aspecto en el capítulo 6 se presenta el trabajo titulado “Modelo matemático para la atención de desastres, inundación y remoción de masa en Bucaramanga”, de Aguilar y Martínez, los autores plantean un modelo matemático que busca responder a la decisión de localización de albergues, asignación de afectados y recursos, el modelo contempla un único depósito y una variación multi-depósito. Uno de los principales aportes es la geolocalización de las instalaciones de albergues, manzanas censales y zonas de amenaza.

La educación ha sido un factor decisivo en el desarrollo de las naciones. Una educación de calidad puede asegurar que las personas salgan de la pobreza y avancen en otros aspectos económicos, culturales, entre otros. El avance intensivo de las tecnologías ha permitido a la educación virtual ser un enfoque indispensable para la educación superior; el uso de tecnologías de la información y comunicación (TIC) y la incorporación de Tecnologías de Aprendizaje y Conocimiento (TAC) y las Tecnologías para el empoderamiento y la participación (TEP) para el aprendizaje en ambientes virtuales tienen la difícil tarea de romper paradigmas sobre esta forma de enseñanza. Los autores Díaz, Flores y Navas en el capítulo 7 presentan el trabajo titulado “Percepción de los estudiantes frente a las TIC, TAC y TEP para la enseñanza de ciencias”, en el que buscan conocer la percepción de los estudiantes pregrado y posgrado de la Universidad Santo Tomás frente a las TIC, TAC y TEP en los espacios virtuales de Filosofía Institucional y Humanismo Sociedad y Ética. Encuentran un porcentaje de aprobación por encima del 70% con relación en la percepción de aprendizaje en ambos grupos de estudio.

Mientras que algunos autores han concebido a la ingeniería como un arte, otros la definen como una “profesión”, basada en el dominio y la aplicación de las ciencias físicas y matemáticas, a los recursos naturales, económicos, materiales y humanos, para beneficio del hombre y de la sociedad. Es así que los trabajos aquí presentados nos muestran que cuando los sistemas sociales y la tecnología han podido complementarse entre sí, la ingeniería ha sido inmensamente eficaz para mejorar la vida humana, ya sea evaluando la calidad de procesos en salud, preservando la memoria histórica de una región, identificando factores claves para una producción agrícola más competitiva, desarrollando estrategias para el desarrollo de regiones más resilientes frente a desastres, el desarrollo de equipos electrónicos y mecánicos cada vez más eficientes y autónomos y, finalmente, la evaluación de la calidad de estrategias pedagógicas en la educación superior.

Karin Julieth Aguilar Imitola
Investigadora Grupo CAYPRO

Modelos tridimensionales de realidad virtual, de objetos arqueológicos del periodo histórico Guane temprano

Juan José Barrios Arlante

*Facultad de Optometría, grupo Interdisciplinario de Investigaciones Epidemiológicas en el Sistema Visual - GIESVI, Universidad Santo Tomás, Bucaramanga, Colombia,
Correo electrónico: juan.barrios01@ustabuca.edu.co*

Carlos Ricardo Contreras Pico

*Departamento de Ciencias Básicas, grupo de Investigación en Ciencias Básicas y Aplicadas - GICIBAYA, Universidad Santo Tomás, Bucaramanga, Colombia,
Correo electrónico: carlos.contreras@ustabuca.edu.co*

Jaime Enrique Meneses Fonseca

*Escuela de Física, grupo de Óptica y Tratamiento de Señales - GOTS, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia,
Correo electrónico: jaimen@uis.edu.co*

Introducción

Es incierto poder tener con precisión el aspecto de muchas obras de arte o monumentos de la historia del hombre desde el momento de su creación. Ninguna imagen que dé fiel crédito de patrimonios de la humanidad como del asentamiento de *Çatalhöyük*, de la esfinge en Egipto, del faro de Alejandría, entre otros.

Para visualizar, a partir de lo que aún queda en pie, cómo debieron ser en realidad el Partenón, el Foro Romano o Persépolis, hay que recurrir a toda la información que los expertos han sido capaces de recopilar. Pero, sobre todo, es un ejercicio de imaginación. La destrucción del patrimo-

nio por el paso del tiempo, las catástrofes naturales o la agresión humana, supone una pérdida irremplazable (Contreras, Barrios y Meneses, 2018).

En el caso particular, la arqueología, que investiga el pasado a partir de los restos hallados y de su contexto histórico, tiene hoy en la digitalización 3D, el escaneo láser, y la informática un triple y poderoso aliado para profundizar en el estudio del patrimonio, y también un instrumento para salvarlo del olvido, las catástrofes naturales o la agresión humana. En el mundo, son muchos los equipos de expertos en imagen digital que se han enfocado en crear modelos 3D y digitalizaciones que reproducen con gran exactitud la obra, el edificio o el yacimiento elegidos: una herramienta del futuro ante su imprevisible y a veces irreparable deterioro (Contreras et al., 2018); (Barrios, Contreras y Meneses, 2019).

Tener acceso al patrimonio arqueológico y de la arquitectura, para una audiencia cada vez mayor, y brindar información a los usuarios interesados de los contenidos de este patrimonio como la textura, color, forma exacta se torna un reto que crece en todo instante debido a las demandas mundiales que solicitan esta información. Los modelos 3D de los objetos o de realidad virtual hacen parte de las nuevas opciones que están siendo utilizadas por los museos del mundo, por ejemplo la plataforma de Sketchfab utilizada por el Museo Británico o por el Museo de la Real Academia de Bellas Artes de San Fernando.

Teniendo en cuenta la importancia de conservar parte del patrimonio arqueológico, cultural y el de la memoria colectiva, en el presente documento se muestra parte del trabajo que se obtuvo como resultado de una investigación más amplia realizada en la Universidad Santo Tomás, en la cual, el objetivo fue obtener modelos virtuales a partir de la digitalización 3D de objetos arqueológicos pertenecientes al periodo Guane temprano, los cuales hacen parte de la Colección Arqueológica Guane, Fray Alonso Ortiz Galeano, O. P., para gestionar y difundir de mejor manera el patrimonio arqueológico y arquitectónico de la región santandereana (Contreras et al. 2018).

La digitalización del patrimonio cultural y de objetos arqueológicos ha atraído la atención de investigadores en visión y modelos 3D por computador. Un gran número de objetos del patrimonio cultural están siendo

destruidos debido a la erosión natural, a los desastres naturales o a la agresión humana. La digitalización de éstos puede ser usada con fines de preservación, restauración, acceso, y estudio académico. Recientemente, los grandes desarrollos en digitalización 3D han permitido la preservación digital de objetos arqueológicos y del patrimonio cultural. Ejemplos representativos incluyen el proyecto del Gran Buda (Ikeuchi, K., Oishi, T., Takamatsu, J., Sagawa, R., Nakazawa, A., Kurazume, R., & Okamoto, Y. 2007) y el proyecto Miguel Ángel de la Universidad de Stanford (Levoy, M., Pulli, K., Curless, B., Rusinkiewicz, S., Koller, D., Pereira, L., & Shade, J. 2000). La Figura 1 muestra una imagen bidimensional de un modelo 3D de realidad virtual. Modelos 3D como éste son obtenidos a partir de la digitalización de la forma 3D de objetos reales, que contiene la información topográfica y cromática de su superficie. Desde el proyecto Miguel Ángel (Levoy et al. 2000), hasta la fecha, (Delpiano, D., Peresani, M., & Pastoors, A. 2017); (Katz, J. C. 2017); (Hermon, S., Depalmas, A., Lopez, M. D. V., & Atzeni, I. 2017); (Inzerillo, L., & Santagati, C. 2016); (Guidi, G., Barsanti, S. G., Micoli, L. L., & Russo, M. 2015); (Koutsoudis, A., Arnaoutoglou, F., Tsaouselis, A., Ioannakis, G., & Chamzas, C. 2015), varios proyectos de investigación se han enfocado en el diseño y construcción de sistemas (*software* y *hardware*) adecuados para digitalizar obras complejas que pertenecen al patrimonio arqueológico cultural (Contreras et al., 2018) (Barrios et al., 2019).

Figura 1. *Modelo 3D en realidad virtual de la cabeza de Miguel Ángel*



Fuente: (Levoy et al., 2000).

La textura y la forma tridimensional de un objeto es posible escanearla con dispositivos optoelectrónicos o escáneres 3D de gran precisión. Actualmente se tiene acceso a diversos métodos, a través de los cuales se puede digitalizar la forma 3D de un objeto con resoluciones y precisiones ajustables a las dimensiones del objeto en estudio. Entre los métodos se tienen los pasivos (Prados y Faugeras, 2006); (Marques y Costeira, 2008); (Beardsley y Zisserman, 1996); (Pollefeys, Proesmans, Koch, Vergauwen y Van Gool, 2008); (Meneses y Contreras, 2011), en los que no se proyecta ningún tipo de energía sobre la superficie del objeto por digitalizar, y activos, (Cheng, Su y Guo, 1991); (Contreras y Meneses, 2009); (Barrera, Torres, Contreras y Meneses, 2013); (González, Meneses y León, 2012); (Moosmann, Pink y Stiller, 2009); (Bi y Wang, 2010); (Chaparro, Contreras y Meneses, 2013), en los que se proyecta energía, por ejemplo, un patrón de luz u ondas ultrasónicas, sobre la superficie de la muestra (Contreras et al., 2018); (Barrios et al., 2019).

De forma optoelectrónica se digitaliza tridimensionalmente, a través del cual se extrae la información topográfica de la superficie de un objeto de estudio. Lo anterior implica que, desde un sistema de referencia se digitalizan las coordenadas de los puntos observados de la muestra, empleando una técnica de digitalización 3D. Los dispositivos de digitalización presentan una naturaleza bidimensional al digitalizar las imágenes, esto hace que se utilicen métodos ópticos para codificar la información 3D en diferentes alternativas, tales como:

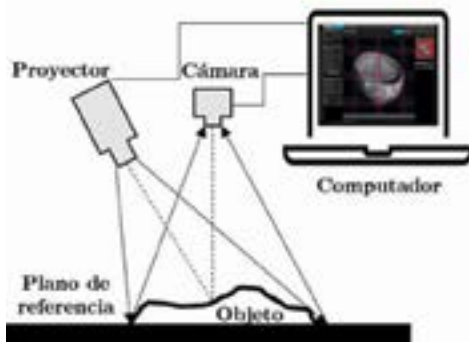
Deformación de una línea láser proyectada sobre el objeto (Cheng, X. X., Su, X. Y., and Guo, L. R. 1991); (Contreras, R., and Meneses J. 2009), variación bidimensional del paso y orientación de franjas proyectadas (Barrera, M., Torres, G., Contreras, C., and Meneses, J. 2013); (González, A., Meneses, J., and León, J. 2012); (Arciniegas, J. R., González, A. L., Quintero, L. A., Contreras, C. R., & Meneses, J. E. 2014), o retardo temporal de pulsos enviados a la superficie, por ejemplo (González-Jorge, H., Riveiro, B., Vázquez-Fernández, E., Martínez-Sánchez, J., and Aria, P. 2013); (Moosmann, et al. 2009); (Bi, Z. M., and Wang, L. 2010); (Chaparro et al. 2013) . De esta manera, una variable de naturaleza óptica es alterada en función de la topografía de la superficie del objeto. El procesamiento para la digitalización 3D, permite inicialmente: a) calcular el valor de la variable óptica utilizada como codificación

para todos los puntos de la superficie que han sido digitalizados y b) calcular las alturas correspondientes a partir de la información obtenida anteriormente”. (Contreras et al. 2018); (Barrios et al. 2019).

Se adquirió el dispositivo “HP 3D Scan” que utiliza la técnica de proyección de franjas. Teniendo en cuenta la irregularidad topográfica de las muestras arqueológicas, se hizo necesario extraer información a 360° de observación, y debido a las características reflectantes de cada una de las superficies de los modelos utilizados para la digitalización, se implementó el dispositivo mencionado anteriormente, a través del cual se logró extraer información 3D de los objetos arqueológicos.

La técnica de proyección de franjas se basa en la deformación que sufren las franjas proyectadas sobre el objeto de estudio debido a las variaciones topográficas en su superficie. El sistema óptico consta principalmente de dos partes: un sistema de proyección, utilizado para proyectar un patrón de franjas, con perfil de intensidad sinusoidal, sobre la superficie de un objeto, y un sistema de observación, donde se observa el patrón de franjas proyectado sobre el plano de referencia antes y después de ubicar el objeto a digitalizar, ver Figura 2 (Contreras et al., 2018).

Figura 2. *Sistema optoelectrónico implementado*



Fuente: Autores.

Como se escribió anteriormente, los objetos de estudio presentan grandes inconvenientes al procedimiento clásico de digitalización 3D por proyección de franjas. Las sombras y regiones ocultas a los sistemas de

proyección y observación producen regiones negras y discontinuas en las franjas, dificultándose la obtención de la forma 3D. Estrategias como la variación de la posición relativa entre el sensor y el objeto permiten obtener múltiples digitalizaciones, al integrarlas en un único sistema coordinado, dan como resultado la digitalización 3D del objeto a 360° de observación (Contreras Pico, C. R. 2014). Algoritmos de registro de información 3D, como el Iterative Closest Point (ICP), (Besl, P. J., & McKay, N. D. 1992), permiten determinar las transformaciones que se deben implementar para unificar las múltiples digitalizaciones, adquiridas para las diferentes posiciones relativas entre el sensor y el objeto, en un único sistema coordinado (Contreras et al., 2018).

Metodología

El objetivo del proyecto de investigación, del cual surgió el desarrollo del presente capítulo de libro de investigación, fue el de preservar, proteger y difundir parte del patrimonio arqueológico de la Cultura Guane, a partir de la digitalización tridimensional de 24 objetos que hacen parte del periodo histórico Guane temprano. Uno de estos objetos, identificado con el nombre COPA y el serial UST.C.128 D.E.10E se muestra en la figura 3.

Figura 3. *Objeto periodo Guane temprano, copa*

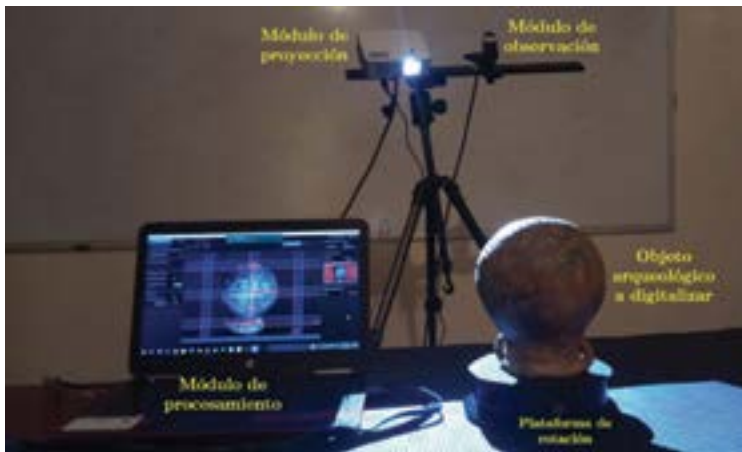


Fuente: Universidad Santo Tomás (s.f.). Colección Arqueológica Guane, Fray Alonso Ortiz Galeano, O.P.

Para el desarrollo del trabajo se adquirió y adaptó el dispositivo de digitalización “HP 3D Scan” fabricado por Hewlett Packard, el cual se caracteriza, entre otras cosas, por digitalizar objetos con resolución de

alrededor de las 100 micras a 360° de observación, esto se logra con la ayuda de la plataforma de rotación, y con gran precisión, por incorporar la textura del objeto a su respectiva digitalización 3D, y por estar conformado por módulos que permiten un montaje experimental que se puede ajustar al tamaño del objeto por digitalizar, como se muestra en la figura 4; el tiempo de escaneo de vistas individuales oscila entre los 5 y los 10 minutos y el proceso de calibración dura por lo menos dos minutos. Además, consta de un *software* que se incorpora en el computador para poder hacer el respectivo procesamiento digital de las imágenes, con el cual se digitalizaron en 3D los objetos arqueológicos del periodo histórico en mención. La información 3D obtenida a través del dispositivo servirá para realizar el entorno de un museo virtual construido con modelos tridimensionales, adicionando escenarios digitales e iluminación artificial.

Figura 4. *Montaje experimental del sistema HP 3D Scan*

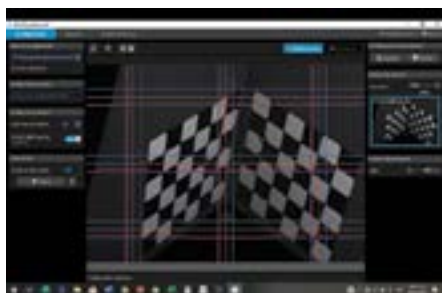


Fuente: Autores.

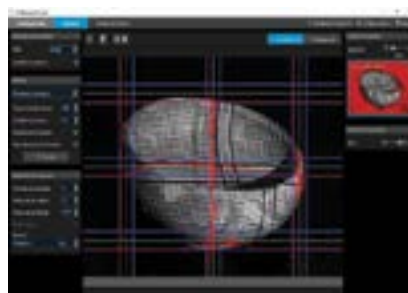
En la “técnica de proyección de franjas, la deformación de las franjas se debe a las variaciones topográficas de la superficie del objeto, dichas variaciones se codifican en la alteración matemática de la fase del sistema de franjas proyectado” (Contreras et al., 2018), figura 5. A partir de diversas imágenes obtenidas del sistema de franjas deformado, es posible

obtener la distribución de fase. Un procedimiento de calibración (González, Contreras y Meneses, 2014) permite convertir la fase en distribución de alturas, obteniéndose la información 3D del objeto. En este caso, el panel de calibración tiene cuatro tamaños de patrones de calibración diferentes (30, 60, 120 y 240 mm). La selección del patrón depende del tamaño del objeto por digitalizar. Para digitalizar un objeto a 360° de observación, este se ubica sobre una plataforma rotatoria, figura 4, la cual está sincronizada con los módulos de proyección y observación. Mientras el objeto rota se capturan múltiples vistas que luego son fusionadas, en un único sistema de coordenadas, teniendo en cuenta puntos correspondientes entre vistas consecutivas y el algoritmo “Iterative Closest Point”, el cual logra la fusión minimizando las distancias entre puntos correspondientes.

Figura 5. (a) Calibración del sistema según el tamaño del objeto. (b) Deformación de las franjas debido a la topografía del objeto arqueológico



(a)

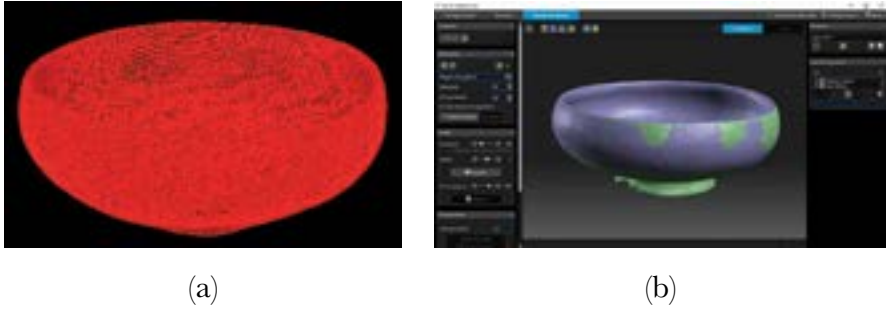


(b)

Fuente: Autores.

Luego de obtener la nube de puntos se procede con la digitalización del objeto en estudio, en la figura 6 se presenta la nube de puntos y el objeto 3D sin textura, posteriormente se aplica la textura que se extrae en el mismo procedimiento a través de la implementación del *software*.

Figura 6. (a) *Nube de puntos del objeto.* (b) *Digitalización 3d del objeto*



Fuente: Autores.

El procedimiento anterior se realizó de forma similar para los 24 objetos arqueológicos, en el presente capítulo del libro de investigación se muestran algunas digitalizaciones obtenidas como resultado en el proyecto desarrollado.

Resultados

Teniendo en cuenta las exigencias metrológicas impuestas por los objetos de estudio, se realizó el montaje de digitalización 3D adaptando el dispositivo “HP 3D Scan” fabricado por Hewlett Packard, el cual estaba conformado, principalmente, por un módulo de proyección, un módulo de observación y un módulo de procesamiento. El módulo de proyección se utilizó para proyectar, sobre la superficie del objeto a digitalizar, un patrón de franjas con perfil sinusoidal. Una plataforma giratoria, con esta, se realizó la rotación 360° de cada objeto. El módulo de observación fue utilizado para registrar las variaciones topográficas del patrón sinusoidal proyectado sobre la superficie del objeto a digitalizar. El módulo de procesamiento se utilizó para procesar la información adquirida por el módulo de observación.

Se determinó el campo de observación, la resolución y la precisión del dispositivo de digitalización tridimensional, teniendo en cuenta los

objetos de estudio. En cuanto al volumen de trabajo, se determinó que el dispositivo fue capaz de digitalizar objetos contenidos en un cubo imaginario, cuya arista, como mínimo fuese de 6 cm y como máximo de 50 cm. En cuanto a la resolución, el sistema logra digitalizar variaciones topográficas del orden de las 100 micras. Por último, en cuanto a la precisión del dispositivo se garantizó la repetibilidad de las digitalizaciones.

Para evaluar metrológicamente, y de manera cualitativa, el dispositivo se digitalizó a 360° de observación, el objeto mostrado en la figura 7 (A), el cual corresponde a la colección en estudio identificado con el código UST.C.054 D.E. 10F como se encuentra relacionado en el Repositorio Institucional de la Universidad Santo Tomás Seccional Bucaramanga. La figura 7 (B) muestra la nube de puntos obtenida o generada a través del *software* implementado.

En la figura 8 (A) se puede observar el modelo 3D obtenido y en la figura 8 (B) se muestra como se observa en la plataforma Sketchfab el modelo 3D de la figura 7, además en la figura 8 (B) se presentan los enlaces respectivos en código QR y en vínculo literal para acceder al objeto en la plataforma mencionada anteriormente.

Figura 7. (a) Objeto por digitalizar. (b) Nube de puntos



(a)



(b)

Fuente: Universidad Santo Tomás (s.f).
Colección Arqueológica Guane, Fray Alonso Ortiz Galeano, O.P.

Fuente: Autores.

Figura 8. (a) *Digitalización 3D.* (b) *Visualización en sketchfab de la imagen 3D*



(a)



(b)



Fuente: Barrios Arlante, J. (s.f.). *3D Model*

En la figura 9 se tiene la posibilidad de acceder al modelo 3D de la figura 8, a través del formato 3D-pdf. Con el cual el lector puede interactuar.

Figura 9. *Interacción 3D con el modelo digitalizado en la figura 8*



Fuente: Modelo 3D del objeto USTC054.

Se logró hacer la digitalización a 360° de observación, de los objetos arqueológicos pertenecientes al periodo histórico Guane temprano y que conforman la Colección Arqueológica Guane, Fray Alonso Ortiz Galeano, O. P., se logró digitalizar las 24 piezas arqueológicas que se presentan en el Repositorio Institucional de la Universidad Santo Tomás Seccional Bucaramanga. La figura 10 muestra uno de los objetos de la colección, de tipo cerámica, de un periodo estimado del siglo VIII-XIII d.C., de un contexto arqueológico Tumba. Esta pieza se asocia con el tipo cerámico Villanueva Ocre sobre Crema Rojo Negro. Información del tenedor actual: Universidad Santo Tomás Seccional Bucaramanga, Campus Floridablanca, sitio web: <https://n9.cl/eg3s>. Certificado de tenencia de bienes pertenecientes al Patrimonio Arqueológico Nacional No. ICANH-130-2003, bajo el número de registro 3496, expedido por el Instituto Colombiano de Antropología e Historia. La figura 11 muestra la nube de puntos obtenida, y la figura 12 el modelo 3D obtenido, se vincula el código QR a través del cual se puede acceder a la digitalización realizada.

Figura 10. *Objeto por digitalizar usc128*



Fuente: Universidad Santo Tomás (s.f.). Colección Arqueológica Guane, Fray Alonso Ortiz Galeano, O.P.

Figura 11. *Nube de puntos del objeto mostrado en la figura 10*

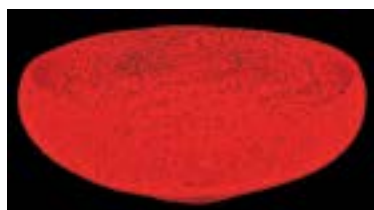
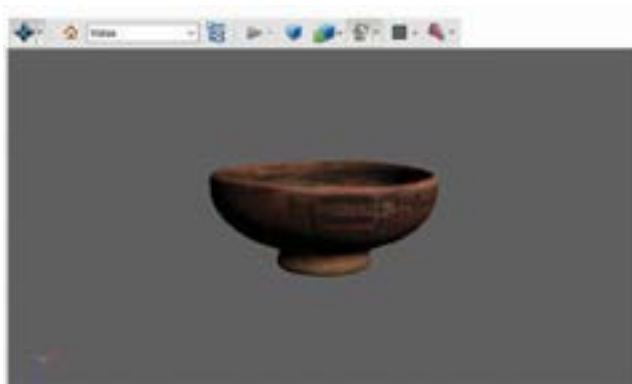


Figura 12. *Modelo 3D del objeto mostrado en la fig 7*



En la figura 13 se tiene la posibilidad de acceder a otro modelo 3D, identificado como COPA y el serial UST.C. 129 D.E. 10D. <https://n9.cl/t85q>, a través del formato 3D-pdf.

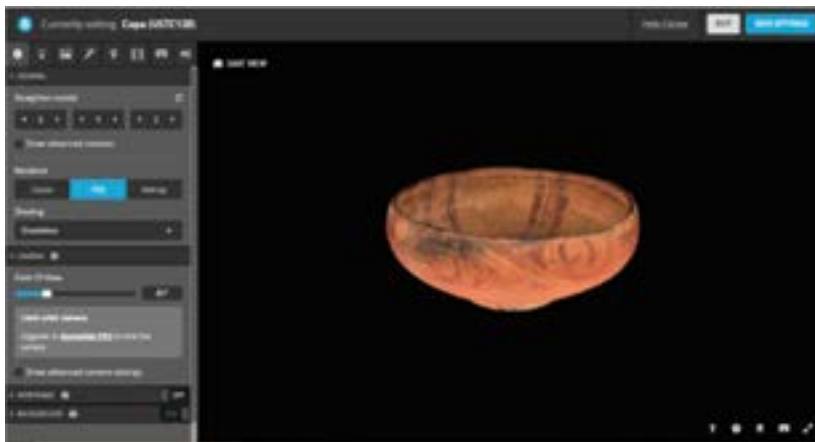
Figura 13. *Interacción 3D con el modelo digitalizado en la fig 8*



Fuente: Modelo 3D del objeto UST.C.129. Autores.

Otro de los resultados alcanzados consistió en descargar varias de las digitalizaciones 3D al repositorio Sketchfab que se obtuvieron con el “HP 3D Scan”. Por ejemplo, la figura 14 muestra la visualización en Sketchfab del modelo 3D mostrado en la figura. 12. Una de las grandes ventajas de Sketchfab es que permite incorporar modelos 3D de realidad virtual, los cuales se pueden visualizar de forma ágil e interactiva desde cualquier computadora o dispositivo móvil, incluso de forma totalmente inmersiva si se tiene un visor de realidad virtual.

Figura 14. Visualización en sketchfab del modelo 3d mostrado en la figura 9



Fuente: Autores.

Conclusiones

Con el desarrollo del presente proyecto de investigación se pudo evidenciar la importancia de digitalizar en 3D objetos prehistóricos, con el fin de conservarlos, admirarlos y estudiarlos. La facilidad de implementar estrategias de visualización 3D vía internet, como repositorios 3D de libre acceso permite el desarrollo de innumerables proyectos en pro de proteger y estudiar colecciones arqueológicas. Indudablemente el soporte principal para este tipo de actividades es el dispositivo de medida 3D. De acuerdo con la calidad visual de los modelos 3D obtenidos, se pudo concluir que el “HP 3D Scan” posee un gran potencial y fue apropiado para digitalizar tridimensionalmente los 24 objetos arqueológicos pertenecientes al periodo histórico Guane temprano, y que hacen parte de la Colección Arqueológica Guane, Fray Alonso Ortiz Galeano, O. P. El dispositivo permite la digitalización de objetos de forma complicada, adquiriendo información 3D a 360° e integrando textura real de la superficie del objeto. El constructor garantiza 100 micras de error, lo cual fue verificado experimentalmente: pequeños detalles superficiales fueron reconstruidos por el dispositivo de medida. El algoritmo de calibración del sistema de proyección de franjas permite ajustar el campo de obser-

vacación de acuerdo con las necesidades experimentales, lo cual facilita la digitalización de objetos de tamaño medio a superior.

Referencias

- Arciniegas, J. R., González, A. L., Quintero, L. A., Contreras, C. R., y Meneses, J. E. (2014). Three-dimensional shape measurement system applied to superficial inspection of non-metallic pipes for the hydrocarbons transport. In *SPIE Sensing Technology+ Applications* (pp. 91100U- 91100U). International Society for Optics and Photonics.
- Barrea, M., Torres, G., Contreras, C., y Meneses, J. (2013). Análisis preliminar de un sistema de reconstrucción tridimensional multicaptor. *INGE CUC*, 9(1), 129-142.
- Barrios, J.J., Contreras, C.R., Meneses, J.E. (2019). *Modelos tridimensionales de realidad virtual del periodo histórico Guane temprano*. (Proyecto de investigación XI Convocatoria Interna, Universidad Santo Tomás Seccional Bucaramanga).
- Barrios, J., Morón, M., Barrios, C., Contreras, R., González, A., y Meneses, J. (2017). Three-dimensional scanning of the cornea by using a structured light module. *Óptica pura y aplicada*, 50(4), 351-357.
- Beardsley, P., Torr, P., y Zisserman, A. (1996). 3D model acquisition from extended image sequences. In *Computer Vision – ECCV’96* (pp. 683-695). Springer Berlin Heidelberg.
- Besl, P. J., y McKay, N. D. (1992). A method for registration of 3-D shapes. *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 14(2), 239-256.
- Bi, Z. M., y Wang, L. (2010). Advances in 3D data acquisition and processing for industrial applications. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 26(5), 403-413.
- Chaparro, L. X., Contreras C. R., y Meneses, J. E. (2013). Operating principle of a high resolution ultrasonic ranging system based in a phase processing. In *8th Ibero American Optics Meeting/11th Latin American Meeting on Optics, Lasers, and Applications* (pp. 87853D-87853D). International Society for Optics and Photonics.
- Cheng, X. X., Su, X. Y., y Guo, L. R. (1991). Automated measurement method for 360 pro-filometry of 3-D diffuse objects. *Applied Optics*, 30(10), 1274-1278.

- Contreras, C. R. (2014). *Análisis tridimensional de objetos a 360° de observación y campo amplio con múltiple configuración proyector-cámara a partir de iluminación estructurada* (Tesis de Doctorado, Universidad Industrial de Santander).
- Contreras, C.R., Barrios, J.J., Meneses, J.E. (2018). *Digitalización tridimensional de objetos Arqueológicos usando un sensor Kinect* (Proyecto de Investigación X Convocatoria Interna, Universidad Santo Tomás Seccional Bucaramanga).
- Contreras, R., y Meneses J. (2009). Dispositivo óptico de medida 3D con simetría cilíndrica: Aplicaciones en balística. *Bistua: Revista de la Facultad de Ciencias Básicas*, 7(2), 42-52.
- Delpiano, D., Peresani, M., y Pastoors, A. (2017). The contribution of 3D visual technology to the study of Palaeolithic knapped stones based on re-fitting. *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*, 4, 28-38.
- González, A. L., Contreras, C. R., y Meneses, J. E. (2014). Accurate and flexible calibration technique for fringe projection profilometry by using encoded points and Fourier analysis. In *Proc. of SPIE*, 9110, 91100X-1.
- González, A., Meneses, J., y León, J. (2012). Proyección de franjas en metrología óptica facial. *INGE CUC*, 8(1), 191-206.
- González-Jorge, H., Riveiro, B., Vázquez-Fernández, E., Martínez-Sánchez, J., y Aria, P. (2013). Metrological evaluation of Microsoft Kinect and Asus Xtion sensors. *Measurement*, 46(6), 1800- 1806.
- Guidi, G., Barsanti, S. G., Micoli, L. L., y Russo, M. (2015). *Massive 3D digitization of museum contents. In Built Heritage: Monitoring Conservation Management* (pp. 335-346). Springer International Publishing.
- Hermon, S., Depalmas, A., Lopez, M. D. V., y Atzeni, I. (2017). *A 3D approach to the archaeological study of the built remains at the Santa Cristina well sanctuary, Sardinia, Italy*. Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage.
- Ikeuchi, K., Oishi, T., Takamatsu, J., Sagawa, R., Nakazawa, A., Kurazume, R., y Okamoto, Y. (2007). The great buddha project: Digitally archiving, restoring, and analyzing cultural heritage objects. *International Journal of Computer Vision*, 75(1), 189-208.
- Inzerillo, L., y Santagati, C. (2016). Crowdsourcing Cultural Heritage: From 3D Modelling to the Engagement of Young Generations. In *Euro-Mediterranean Conference* (pp. 869-879). Springer International Publishing.
- Katz, J. C. (2017). *Digitized Maya Music: The Creation of a 3D Database of Maya Musical Artifacts*. Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage.

- Koutsoudis, A., Arnaoutoglou, F., Tsaouselis, A., Ioannakis, G., y Chamzas, C. (2015). *Creating 3D Replicas of Medium-to Large-Scale Monuments for Web-Based Dissemination Within the Framework of the 3D-Icons Project*. CAA2015, 971.
- Levoy, M., Pulli, K., Curless, B., Rusinkiewicz, S., Koller, D., Pereira, L., y Shade, J. (2000). The digital Michelangelo project: 3D scanning of large statues. In *Proceedings of the 27th annual conference on Computer graphics and interactive techniques* (pp. 131-144). ACM Press/Addison- Wesley Publishing Co.
- Marques, M., y Costeira, J. (2008). 3D face recognition from multiple images: A shape-from motion approach. In *Automatic Face & Gesture Recognition, 2008. FG'08*. 8th IEEE International Conference on (pp. 1-6). IEEE.
- Meneses, J. E., y Contreras, C. R. (2011). Digital approximation to extended depth of field in no telecentric imaging systems. In *Journal of Physics: Conference Series*, 274(1), 012040. IOP Publishing.
- Moosmann, F., Pink, O., y Stiller, C. (2009). Segmentation of 3D LIDAR data in non-flat urban environments using a local convexity criterion. In *Intelligent Vehicles Symposium, 2009 IEEE* (pp. 215-220). IEEE.
- Pollefeys, M., Proesmans, M., Koch, R., Vergauwen, M., y Van Gool, L. (2008). Detailed model acquisition for virtual reality. *Virtual Reality in Archaeology, to appear, ArchaeoPress*.
- Prados, E., y Faugeras, O. (2006). Shape from shading. In *Handbook of mathematical models in computer vision* (pp. 375-388).

Implementación de un filtro analógico selectivo en frecuencia con parámetros variantes en el tiempo

William Razvan Castro Jaluba

*Facultad de Ingeniería Mecatrónica, grupo de Investigación en Aplicaciones Mecatrónicas - GRAM, Universidad Santo Tomás Bucaramanga, Colombia,
Correo electrónico: williamrazban12@ustabuca.edu.co*

Carlos Ricardo Contreras Pico

*Grupo de Investigación en Ciencias Básicas y Aplicadas – GICIBAYA, Universidad Santo Tomás Bucaramanga, Colombia,
Correo electrónico: ricardocp07@gmail.com*

Introducción

Dentro de las problemáticas de ingeniería, una de las más encontradas tiene que ver con la necesidad de filtrar las señales que se procesan para algún tipo de utilidad en particular. Una de las formas más utilizadas de hacer filtrado es con filtros LTI (Linear Time Invariant), los cuales normalmente son implementados a través de filtros activos. Estos filtros, al tener sus parámetros constantes, una vez implementados tienen unas características fijas, establecidas por sus parámetros.

Los filtros LTV (Linear Time Variant) se constituyen en una alternativa para mejorar las características de los filtros LTI. En este trabajo se toma la propuesta de implementación de un filtro LTV presentado en el trabajo “A New Class of Continuous-Time Delay-Compensated

Parameter-Varying Low-Pass Elliptic Filters With Improved Dynamic Behavior”. En este trabajo solo se muestran a nivel de simulación las características del filtro planteado. En el presente trabajo se desarrolla la implementación física del filtro LTV en un sistema FPAA y se compara su comportamiento con el filtro LTI, tanto en la implementación física como a nivel de simulación.

En el capítulo dos se enuncian los objetivos. En el tercer capítulo se muestra de manera muy sucinta los aspectos teóricos acerca del filtrado y los FPAA. El cuarto capítulo muestra los aspectos relacionados con el análisis matemático de los subsistemas que componen el sistema del filtro LTV y su simulación, la cual se hace en Simulink. En el capítulo quinto se muestra en qué consiste el sistema de desarrollo FPAA utilizado, cómo está constituido y cómo funciona. El sexto capítulo presenta el *software* de programación y simulación con el cual trabajan los FPAA del fabricante seleccionado (Anadigm Designer 2). El séptimo capítulo muestra el resultado de la implementación de cada etapa del filtro LTV y del conjunto, junto a una comparación con el filtro LTI. Finalmente, el octavo capítulo presenta las conclusiones del trabajo.

Desarrollo

El objetivo del trabajo corresponde a desarrollar una implementación circuital de un filtro analógico lineal con parámetros variantes en el tiempo. Inicialmente se plantea el análisis del comportamiento del filtro en su versión de parámetros invariantes para hacer una comparación y establecer las ventajas del filtro con parámetros variantes.

Para la implementación circuital se decidió utilizar un sistema de desarrollo constituido por FPAA (Field Programmable Analog Array) de la empresa Anadigm. Este sistema posee un simulador, con el cual se comprobó inicialmente el funcionamiento de los dos tipos de filtros (LTI y LTV) y esta simulación se contrastó con los resultados físicos de la implementación circuital.

Field Programmable Analog Array (Fpaa)

Un Field Programmable Analog Array (FPAA) es un circuito integrado que contiene bloques analógicos configurables (Configurable Analog Blocks-CAB), que están interconectados entre sí. Los FPAA poseen diferentes arquitecturas y modos de operación.

La operación puede ser en tiempo continuo o tiempo discreto. En tiempo continuo se debe tener en cuenta la contribución de las inductancias, capacitancias parásitas y ruido debido a las matrices de interruptores de las FPAA. Para evitar estos problemas, mientras se logra mayor flexibilidad, se utilizan dispositivos de tiempo discreto. En estos FPAA se manejan circuitos de muestreo y retención (Sample and Hold-S/H) en cada salida de los CAB, obteniendo una señal continua, pero operando en tiempo discreto con alta frecuencia.

La técnica principal utilizada en FPAA de tiempo discreto es la tecnología de condensadores conmutados. Con esta tecnología se puede obtener una resistencia a partir de un condensador. El valor de la resistencia se puede modificar de acuerdo con la frecuencia de muestreo. Este es uno de los principales conceptos en las FPAA debido a que esta tecnología permite la creación de diferentes resistencias que pueden modificar su valor durante el funcionamiento del sistema (reconfiguración dinámica), siendo este aspecto una de las principales ventajas de las FPAA.

Para el desarrollo de este proyecto se tomó como estudio de caso un filtro pasa bajos elíptico de segundo orden.

Análisis matemático y simulación

A partir de la revisión bibliográfica realizada, se decidió tomar como base para el desarrollo de este proyecto, el artículo “A New Class of Continuous-Time Delay-Compensated Parameter-Varying Low-Pass Elliptic Filters With Improved Dynamic Behavior”. Trabajo en el que se presenta un filtro elíptico

pasa bajos de parámetros variables y compensado en retardo. A continuación, se verificarán los aspectos planteados en este trabajo.

El filtro elíptico propuesto como estudio de caso tiene las siguientes características: orden 2, rizado pico-pico en la banda pasante $R_p = 0.5d < bB$, atenuación mínima en la banda de rechazo $R_s = 60dB$ frecuencia de corte $\omega_c = 1rad/sg$. A partir de estas especificaciones se obtiene la siguiente función de transferencia del filtro (Ecuación 1:

$$H_F(S) = \frac{0.001S^2 + 1.432}{S^2 + 1.425S + 1.517} \quad (1)$$

La función de transferencia tipo para un filtro elíptico pasa bajos de segundo orden en función de los parámetros que caracterizan su respuesta dinámica ($\zeta Y \omega_n$), está dada por la Ecuación 2:

$$H_F(S) = \frac{h_0(S^2 + K^2 \omega_n^2)}{S^2 + 2\zeta \omega_n S + \omega_n^2} \quad (2)$$

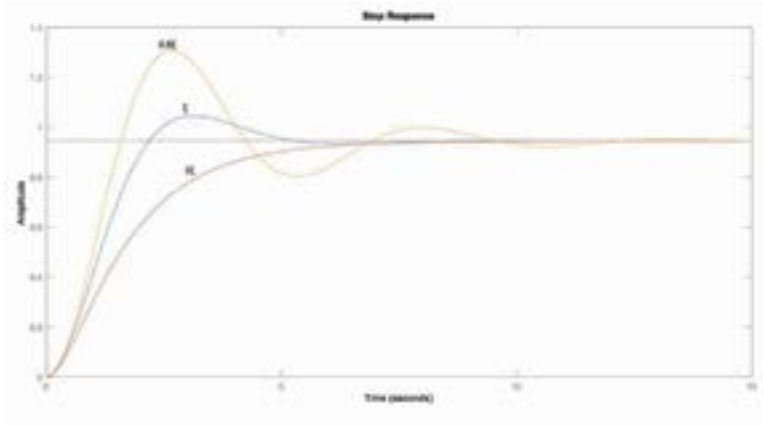
Donde h_0 y k son constantes, ζ es el factor de amortiguamiento y ω_n es la frecuencia natural no amortiguada.

Para el caso del filtro planteado, $h_0 = 0.001$, $k = 30.716$, $\zeta = 0.578$ y $\omega_n = 1.232$, el valor del factor de amortiguamiento tiene efecto en el *overshoot* de la respuesta al escalón del filtro (figura 15) y el valor de la frecuencia natural no amortiguada tiene efecto en el tiempo de asentamiento de la respuesta escalón (figura 16).

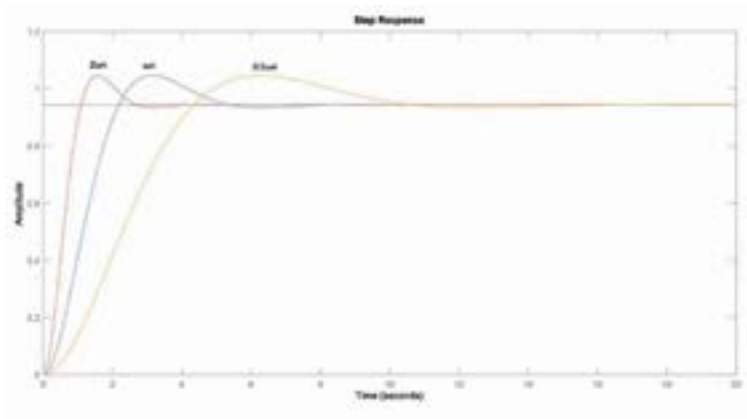
Para mejorar la respuesta dinámica del filtro, se propone variar los parámetros dinámicos del filtro, para que la ecuación diferencial del filtro quedara de la forma (Ecuación 3):

$$y''(t) + 2\zeta(t)\omega_n(t)y'(t) + \omega_n^2(t)y(t) = h_0[x'(t) + k^2\omega_n^2(t)x(t)] \quad (3)$$

Siendo $x(t)$ la entrada y $y(t)$ la salida. Las funciones $\zeta(t)$ y $\omega_n(t)$ definen la variación del factor de amortiguamiento y la frecuencia natural no amortiguada.

Figura 15. *Respuesta escalón para diferentes valores de factor de amortiguamiento*

Fuente: Autores.

Figura 16. *Respuesta escalón para diferentes valores de frecuencia natural no amortiguada*

Fuente: Autores.

Teniendo en cuenta la forma en que ζ y ω_n afectan el comportamiento dinámico del filtro, se plantea que para mejorar el comportamiento dinámico (reducir tiempo de asentamiento y *overshoot*) se debe presentar un incremento momentáneo en los parámetros del filtro en el

instante en el que se produce un comportamiento transitorio. Las funciones planteadas para establecer la variación de los parámetros del filtro son (Ecuación 4 y Ecuación 5):

$$\omega_n(t) = \varpi_n [1 + (d_\omega - 1)h_s(t)] \quad (4)$$

$$\zeta(t) = \xi [1 + (d_\zeta - 1)h_s(t)] \quad (5)$$

Donde $\varpi_n = \lim_{t \rightarrow \infty} \omega_n(t)$, $\xi = \lim_{t \rightarrow \infty} \zeta(t)$ corresponden a los parámetros del filtro con parámetros constantes. Los coeficientes d_ω y d_ζ definen los rangos de variación de las funciones $\omega_n(t)$ (Ecuación 6) y $\zeta(t)$ (Ecuación 7).

$$d_\omega = \frac{\omega_n(0)}{\varpi_n} \quad (6)$$

$$d_\zeta = \frac{\zeta(0)}{\xi} \quad (7)$$

La función $h_s(t)$ corresponde a la respuesta escalón del sistema variador de primer orden con función de transferencia (Ecuación 8):

$$H_s(s) = \frac{rs}{rs + 1} \quad (8)$$

De esta forma, la respuesta al escalón corresponde a la Ecuación 9:

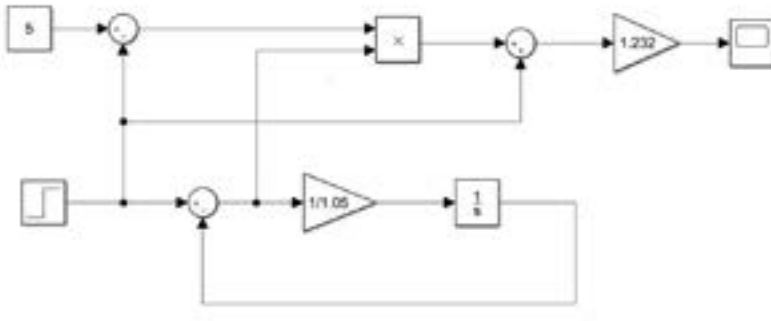
$$h_s(t) = e^{-t/r} u(t) \quad (9)$$

Siendo $u(t)$ es escalón unitario y r la constante de tiempo del sistema variador de primer orden que establece la rata de variación exponencial de las funciones $\omega_n(t)$ y $\zeta(t)$.

El parámetro r y los rangos de variación d_ω y d_ζ se determinan a través de un método de optimización, asegurando las condiciones de estabilidad del filtro. Para el filtro del caso analizado, $r = 1.05$, $d_\omega = 5$ y $d_\zeta = 1.6$.

La figura 17 muestra el diagrama de bloques del sistema variador para lograr la función $\omega_n(t)$. Un sistema similar se implementa para obtener la función $\zeta(t)$.

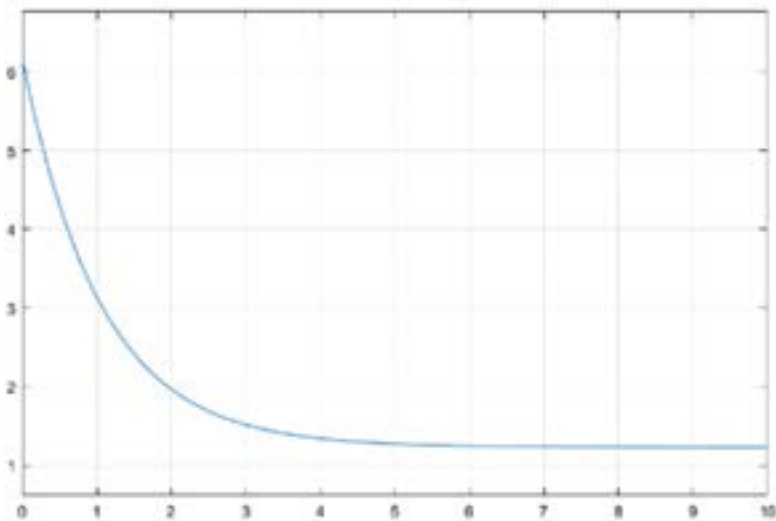
Figura 17. Diagrama de bloques sistema variador



Fuente: Autores.

La figura. 18, muestra la respuesta escalón del sistema variador.

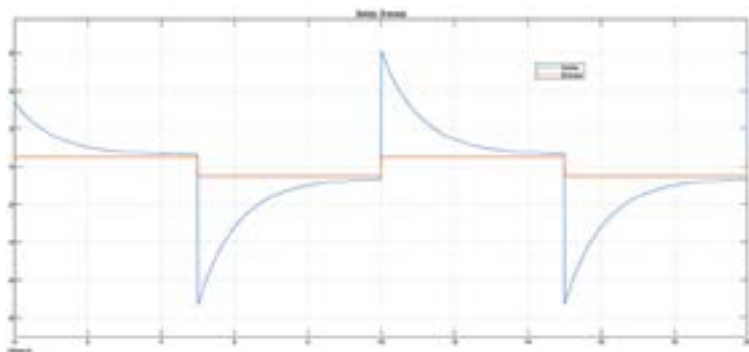
Figura 18. Respuesta escalón sistema variador



Fuente: Autores.

La figura 19 muestra la respuesta del sistema variador ante una señal de entrada cuadrada simétrica de 0.5 V de amplitud y período de 10 sg.

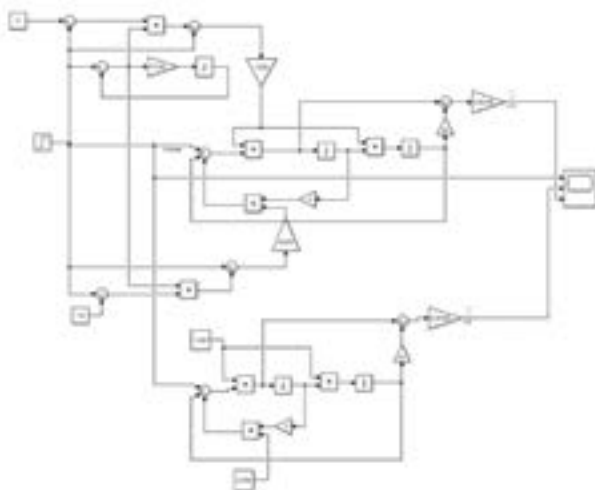
Figura 19. *Respuesta sistema variador ante señal cuadrada*



Fuente: Autores.

La figura 20 muestra el diagrama de bloques realizado para obtener la respuesta escalón del filtro con parámetros constantes (linear time invariant-LTI) y el filtro con parámetros variantes (linear time variant-LTV).

Figura 20. *Diagrama de bloques filtros LTI y LTV*

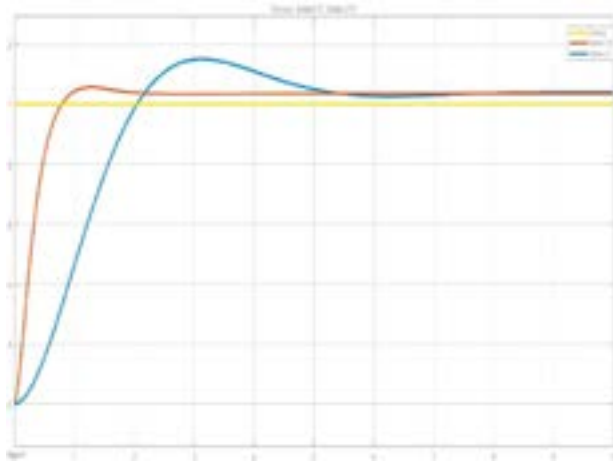


Fuente: Autores.

La figura 21 muestra la respuesta de los filtros, donde se puede observar el cambio en la respuesta dinámica del filtro.

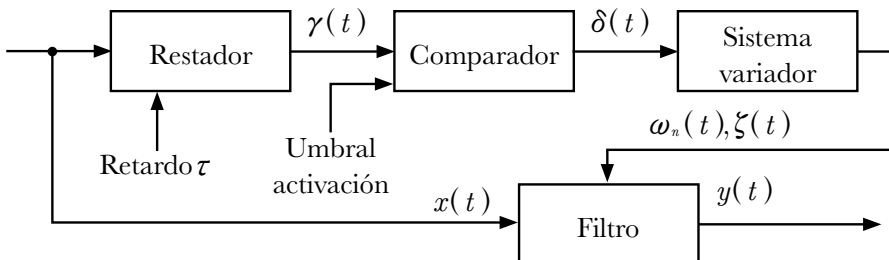
Para efectos de poder aplicar esta técnica ante señales con transiciones tipo escalón, las cuales no se deben a ruido, se requiere un sistema que detecte estas transiciones en la señal de entrada. La figura 22 muestra el diagrama de bloques del sistema propuesto para tal fin.

Figura 21. Comparación respuesta escalón filtros LTI y LTV



Fuente: Autores.

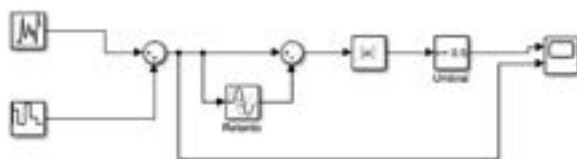
Figura 22. Diagrama de bloques detector variaciones tipo escalón



Fuente: Autores.

La figura 23 muestra el diagrama de bloques realizado para obtener la señal de disparo que detecta las variaciones tipo escalón $\delta(t)$ y activa la variación de los parámetros del filtro. El conjunto del restador junto con el comparador lo denominamos Sistema Disparador.

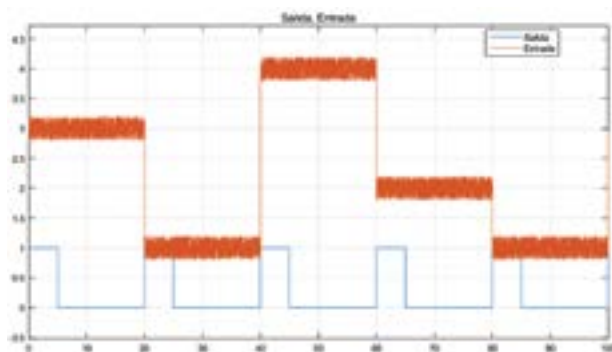
Figura 23. *Generador señal de disparo*



Fuente: Autores.

La figura 24 muestra la salida del sistema disparador ante una señal de entrada con variaciones tipo escalón con ruido.

Figura 24. *Señal de disparo ante señal con ruido*

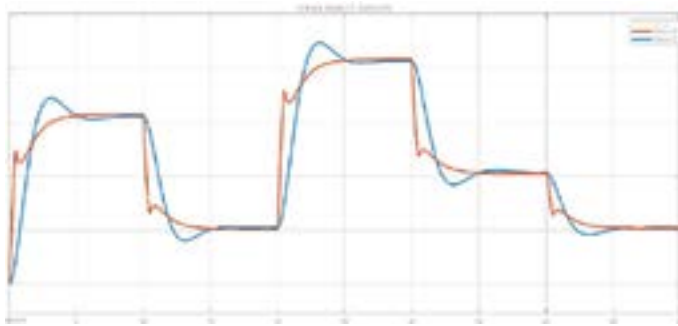


Fuente: Autores.

Los autores del trabajo tomado como base plantean que la salida del disparador no solo sea introducida al sistema variador, sino que también sea introducida a la entrada reset del integrador del sistema variador. Se pudo evidenciar que la salida del sistema variador no se ve afectada por la utilización de la entrada de reset del integrador.

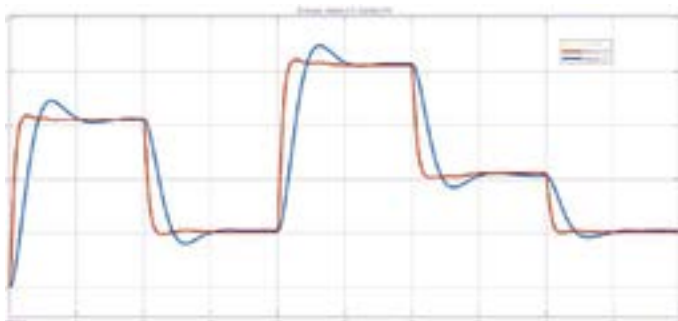
Por otro lado, se pudo notar que el valor del retardo utilizado para generar el impulso de activación de la variación de los parámetros influye en el comportamiento del sistema. Esto debido a que los parámetros no lo evolucionan suficientemente hasta el valor requerido para obtener el comportamiento deseado. Las figuras 25 y 26 muestran este efecto, en la figura 25 se tiene un retardo de 0.5 sg y en la figura 12 se tiene un retardo de 2.5 sg.

Figura 25. Salida filtro con retardo de 0.5 sg



Fuente: Autores.

Figura 26. Salida filtro con retardo de 2.5 sg

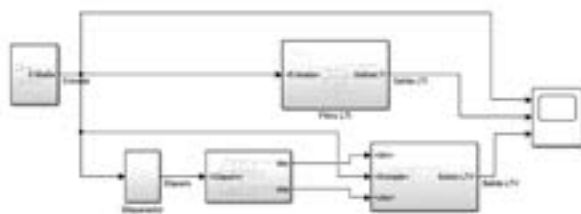


Fuente: Autores.

La figura 27 muestra el diagrama de bloques implementado para comparar la salida del filtro con coeficientes constantes (LTI) con la salida

del filtro con coeficientes variantes en el tiempo (LTV), ante una señal con variaciones de tipo escalón con ruido.

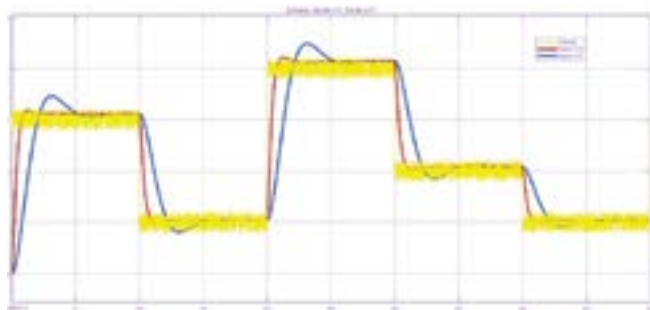
Figura 27. Diagrama de bloques comparación filtros LTI-LTV



Fuente: Autores.

La figura 28 muestra la comparación de la señal de la salida de los filtros LTI y LTV con relación a la entrada.

Figura 28. Comparación filtros LTI-LTV con respecto a la entrada



Fuente: Autores.

Sistema FPAA

Para la implementación circuital del filtro se decidió utilizar una tarjeta de desarrollo de la empresa Anadigm (Quad Apex), teniendo en cuenta su facilidad en la adquisición. La tarjeta de desarrollo Quad Apex es un sistema que permite implementar y probar diseños analógicos con

facilidad. La tarjeta posee un microcontrolador PIC32 y 4 dispositivos FPAA referencia AN231E04 (figura 29).

En la nomenclatura utilizada por Anadigm para identificar los FPAA se tiene el siguiente formato: ANXXXEXX, la primera X luego de la sigla AN hace referencia al tipo de configuración, “1” para estáticas y “2” para dinámicas; la segunda X hace referencia a la generación del producto, “2” para segunda generación y “3” para tercera generación; la tercera X hace referencia a la interfaz de E/S, “0” para E/S fijas y “1” para E/S flexibles; las dos últimas X hacen referencia a la cantidad de CAB’s (Configurable Analog Blocks, Bloques Analógicos Configurables) que contiene el FPAA.

Figura 29. Tarjeta de desarrollo *Quad Apex*



Fuente: Autores.

A nivel de *hardware* en la tarjeta de desarrollo se pueden resaltar las siguientes características:

- Se alimenta con una fuente DC sencilla con un rango de voltaje de 4 a 6 V.
- Fuentes de alimentación reguladas de +3.3 V y -3.3 V.
- Interfaz serial USB para carga de archivos a través del *software* Anadigm Designer 2 (AD2).

- Microcontrolador PIC de 32 bits con reloj de 80 MHz, 512k de memoria de programa, 32k de memoria de datos y convertidor A/D de 16 canales de 10 bits.
- Posibilidad de tener un reloj maestro de 16 o 40 MHz.
- Capacidad para manejar display LCD 16x2.
- Áreas de conexión análoga y digital.
- Filtros de entrada pasa bajos tipo Rauch configurables.
- Buffers de salida pasa bajos configurables.

Software Anadigm Designer 2

Los integrados FPAA de Anadigm se programan a través del *software* Anadigm Designer 2. Este *software* no solo permite la programación de los FPAA, sino que también permite simular el comportamiento del circuito programado. Adicionalmente el software incluye una herramienta para diseño de filtros activos y una herramienta para diseño de controladores PID.

La programación en el *software* se hace a través de los denominados CAM's (Configurable Analog Module-Módulos Analógicos Configurables), los cuales se van colocando dentro del integrado para luego ser interconectados.

Implementación Circuital

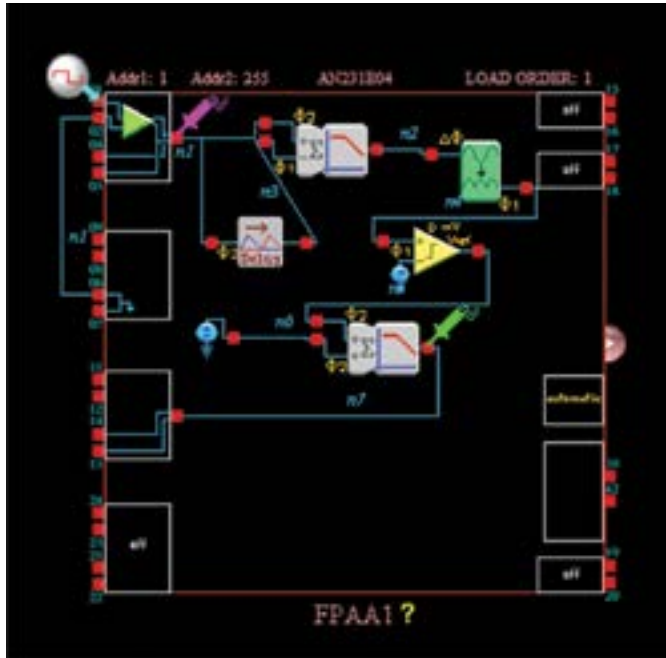
El sistema está conformado por varias etapas: un circuito disparador, dos circuitos variadores y el filtro. El circuito disparador crea un pulso que activa la variación de los parámetros. Los circuitos variadores varían los parámetros del filtro (frecuencia natural y amortiguamiento).

A continuación, se muestra cada una de las etapas de forma individual y su funcionamiento bajo simulación en el Anadigm Designer 2.

Circuito disparador

En la figura 30 se detalla el sistema disparador. El circuito que se realiza para implementar este sistema en el FPAA se muestra en la figura 30.

Figura 30. *Implementación circuito disparador*



Fuente: Autores.

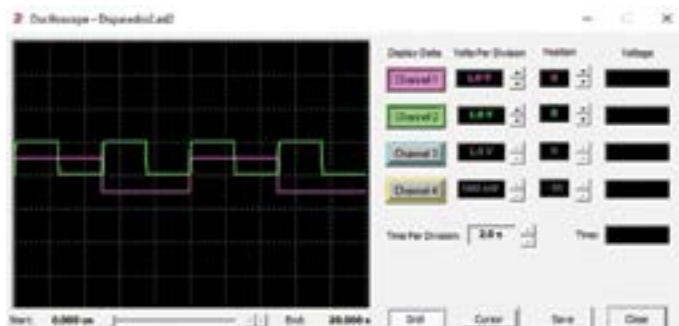
Es importante resaltar lo siguiente: debido a que la señal de entrada al sistema se genera con un generador de señal arbitrario, con referencia a tierra, y el FPAA trabaja internamente con señales diferenciales, se observa que en el puerto de entrada existe un amplificador, el cual cumple la función de convertir la señal de entrada single-ended a señal diferencial. La magnitud de la señal se obtiene con el CAM de rectificación. Debido a que el CAM comparador entrega una señal de $\pm 2V$, se hace necesario utilizar la última etapa en el circuito de la FPAA, la cual escala la señal de salida del comparador a un pulso de amplitud entre 0 y 1.

Por otro lado, también es importante tener en cuenta que las señales diferenciales dentro del FPAA tienen una señal en modo común de 1.5V, por lo cual la señal single-ended de entrada tiene una componente de continua de 1.5V adicionada. Esta componente de continua adicionada en el generador se compensa con la señal de 1.5V aplicada en el terminal negativo de entrada diferencial de la FPAA. Esta última se obtiene de uno de los puertos de salida de la FPAA.

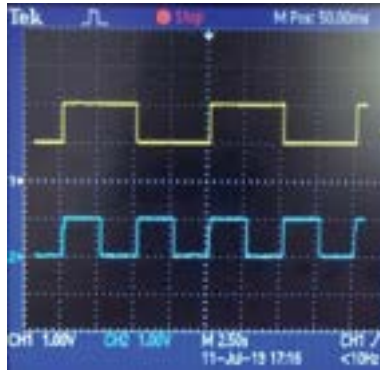
Otro aspecto importante para resaltar consiste en que los fabricantes de la FPAA recomiendan que la frecuencia mínima de reloj utilizada en la tarjeta sea de 1 kHz, sin embargo, con esta frecuencia mínima, el máximo valor de retardo que se configura es de 0.257 s, el cual corresponde a un valor muy pequeño con el que no se obtendría un funcionamiento adecuado del filtro. De esta forma, a pesar de la recomendación de los fabricantes, se utiliza una frecuencia de reloj de 0.1 kHz, con la cual se puede obtener un retardo de hasta 2.57 s.

La figura 31 muestra el resultado de la simulación en Anadigm Designer, utilizando como señal de entrada una señal cuadrada simétrica de 0.5 V de amplitud y frecuencia de 0.1 Hz. Se observa como señal de salida un pulso de amplitud 1 con duración de 2.5 sg, la cual corresponde al retardo configurado. La figura 32 muestra la señal real obtenida a la salida del FPAA a través del osciloscopio.

Figura 31. Simulación en AD2 del circuito disparador



Fuente: Autores.

Figura 32. *Señal de disparo real en osciloscopio*

Fuente: Autores.

Circuito variador

En la figura 33 se presenta el sistema variador para obtener la variación de la frecuencia natural ($\omega_n(t)$). La figura 33 muestra el circuito implementado en la FPAA.

Figura 33. *Implementación circuito variador*

Fuente: Autores.

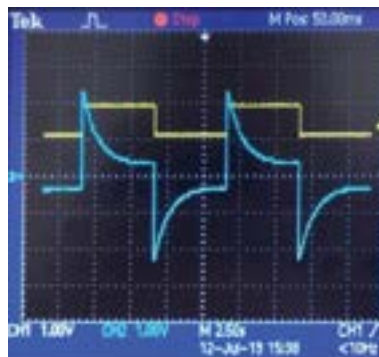
En este circuito se resaltan los siguientes aspectos: para establecer el valor constante de 5 el cual corresponde al rango de variación d_ω , se utiliza una fuente constante de valor 2V y se le aplica una ganancia de 2.5 a través de la entrada del sumador al cual ingresa. La ganancia correspondiente a 1.232, no se aplica a la salida del sumador, sino a ambas entradas del sumador. La figura 34 muestra la salida del circuito variador obtenida en el simulador de AD2. La figura 35 muestra la señal de salida real del circuito implementado en la FPAA, donde puede apreciarse la correspondencia existente.

Figura 34. Simulación en AD2 del circuito variador



Fuente: Autores.

Figura 35. Salida variador real en osciloscopio

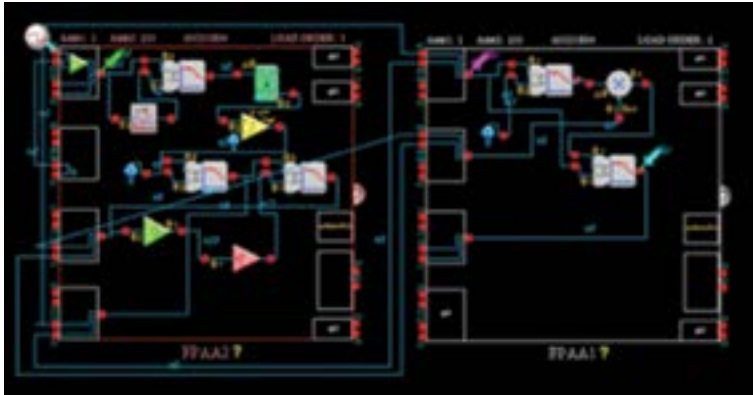


Fuente: Autores.

Circuito disparador-variador

La figura 36 muestra la implementación en conjunto del circuito disparador con el circuito variador.

Figura 36. *Implementación circuito disparador-variador*

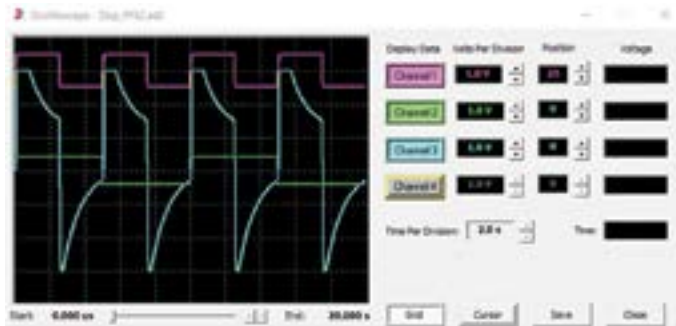


Fuente: Autores.

Para esta implementación se utilizan dos FPAA, en uno se tiene el circuito disparador y parte del circuito variador y en el otro el restante del circuito variador.

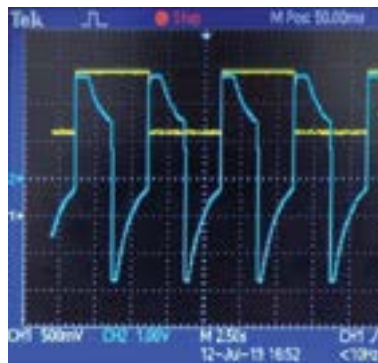
La figura 37 muestra la señal de salida del sistema resultado de la simulación en AD2. La gráfica color verde corresponde a la señal de entrada, onda cuadrada de 0.4 V de amplitud, la gráfica de color rosado corresponde al pulso generado por el circuito disparador en cada transición de la señal de entrada y la señal azul corresponde a la salida del sistema. Se observa cómo se produce la variación de forma exponencial durante el pulso generado por el disparador. La figura 38 muestra la señal de salida real del sistema implementado en los FPAA. La curva amarilla corresponde a la señal de entrada y la curva azul corresponde a la señal de salida del sistema. Se puede evidenciar la correspondencia entre la simulación y la señal real.

Figura 37. Simulación en AD2 circuito disparador-variador



Fuente: Autores.

Figura 38. Salida real circuito disparador-variador en osciloscopio



Fuente: Autores.

Filtro LTI

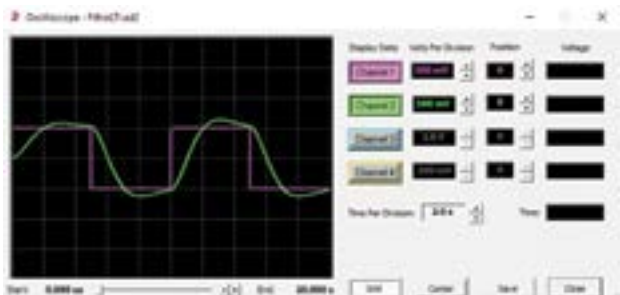
La figura 39 muestra la implementación del filtro LTI. Este filtro fue implementado en una tarjeta Dual Apex, la cual posee dos FPAA AN231E04. La figura 40 muestra la señal de salida del filtro LTI resultado de la simulación en AD2. La figura 41 muestra la señal de salida real del filtro LTI implementado en los FPAA.

Figura 39. *Implementación filtro LTI*



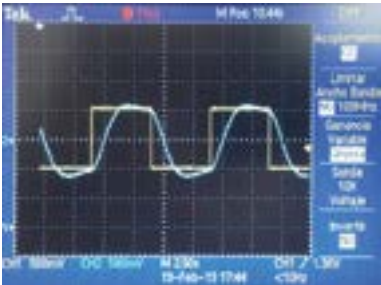
Fuente: Autores.

Figura 40. *Simulación en AD2 filtro LTI*



Fuente: Autores.

Figura 41. *Salida real filtro LTI en osciloscopio*

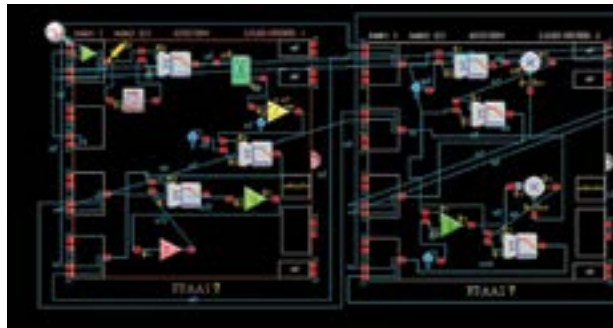


Fuente: Autores.

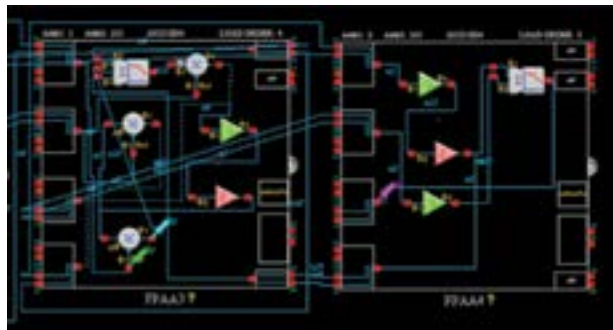
Filtro LTV

La figura 42 A. y B. muestran la implementación completa del filtro LTV. En la figura 42. A. se encuentra el circuito que genera la señal de disparo y la sección del integrador que hace parte del circuito variador (FPAA1); en el FPPA2 se encuentra la otra parte de los circuitos variadores que generan las señales $\omega_n(t)$ y $\zeta(t)$. En la figura 42. B. se encuentran los FPAA3 y FPAA4, en los cuales se implementa el filtro.

Figura 42. A. Primera sección filtro LTV. B. Segunda sección filtro LTV



(A)



(B)

Fuente: Autores.

La figura 43 muestra el resultado de la simulación del filtro LTV. La figura 44 muestra la salida real del filtro LTV implementado en los FPAA.

Utilización de recursos

Cada FPAA un (1) contador, una (1) tabla de búsqueda (Look Up Table-LUT) y cuatro (4) CAB. Cada CAB contiene: 1 registro de aproximaciones sucesivas (Successive Approximation Register-SAR), 8 capacitores, 2 amplificadores operacionales y 1 comparador. Todos estos elementos dan un total de 50 por FPAA.

En la implementación del filtro LTI se requiere la utilización de dos FPAA, resultando en una utilización del 52% del total de los recursos del sistema. La tabla 1 resume los recursos utilizados.

Tabla 1. Recursos utilizados en la implementación del filtro LTI

FPAA	Counter	LUT	SAR	CAP	OPAMP	COMP
1	0	0	3	24	8	3
2	0	0	0	10	4	0

Fuente: Autores.

En la implementación del filtro LTV se requiere la utilización de cuatro FPAA, resultando en una utilización del 63,5% del total de los recursos del sistema. La tabla 2 resume los recursos utilizados.

Tabla 2. Recursos utilizados en la implementación del filtro LTV

FPAA	Counter	LUT	SAR	CAP	OPAMP	COMP
1	1	1	1	26	7	3
2	0	0	2	25	8	2
3	0	0	3	24	8	3
4	0	0	0	9	4	0

Fuente: Autores.

Conclusiones

A partir del trabajo realizado se consiguió implementar el filtro LTV en el sistema FPAA. Se concluye que, para lograr que el efecto de la variación de los parámetros tenga efecto positivo en el funcionamiento

del filtro, se debe utilizar en el sistema disparador un retardo adecuado. Para el caso de este filtro se estableció que con retardos en el disparador inferiores a 1.3 s la salida del filtro se ve afectada.

Por otro lado, para poder emplear un retardo adecuado, se hace necesario trabajar el sistema con frecuencias de reloj inferiores a las recomendadas por el fabricante. El fabricante recomienda trabajar con frecuencias superiores a 1 kHz. Es por lo que, a pesar de la recomendación del fabricante en cuanto a la frecuencia de reloj empleada, el sistema funciona adecuadamente a la frecuencia seleccionada (100 Hz).

También se pudo observar que la implementación del filtro LTV requiere una cantidad considerable de los recursos del FPAA, sin embargo, solo se utiliza el 63,5% de los recursos de todo el sistema. Asimismo, el simulador del *software* AD2 entrega resultados confiables con respecto a los resultados reales obtenidos.

Adicional, se evidencia claramente la característica del filtro LTV en cuanto al mejoramiento de su respuesta dinámica, mejorando tanto su *overshoot* como su tiempo de establecimiento. Finalmente, es importante destacar que el sistema de desarrollo FPAA incorpora una herramienta orientada a controladores PID, la cual se puede constituir en un área de aplicación muy importante para sistemas de control.

Referencias

- Ahmadi, P., Maundy, B., Elwakil, A. S., Belostotski, L. (2011). *Band-pass filters with high quality factors and asymmetric-slope characteristics*. Dept. of Electr. & Amp Comput. Eng., Univ. of Calgary. IEEE 54th International Midwest Symposium on Circuits and Systems (MWSCAS).
- Collins, M., Hasler, J., Shah, S. (2016). *An approach to using RASP tools in analog systems education*. School of Electrical and Computer Engineering, Georgia Institute of Technology. IEEE Frontiers in Education Conference (FIE).
- Erfani, S., Ahmadi, M., Bayan, N. (2013). *Analysis of linear time-varying circuits by two-dimensional analog filtering*. Dept. of Electr. & Comput. Eng., Univ. of Windsor. IEEE 56th International Midwest Symposium on Circuits and Systems (MWSCAS).

- Grzechca, D., Rutkowski, J. (2010). *The use of FPAA in signal processing laboratory for biomedical engineering students*. Institute of Electronics, Silesian University of Technology, Gliwice. ICSES International Conference on Signals and Electronic Circuits.
- Gutiérrez de A., M. A., Sarmiento, A., Hernández, L., Piskorowski, J. y Kaszyński, R. (2009). The reduction of the duration of the transient response in a class of continuous-time LTV filters. *IEEE Trans. Circuits Syst. II Express Briefs*, 56(2), 102-106.
- Gutiérrez de A., M. A., Dector, I. M., y García, J. C. S. (2009). A parameter-varying lowpass filter with reduced transient response. *ECCTD 2009 - Eur. Conf. Circuit Theory Des. Conf. Progr.*, pp. 149-152.
- Jurian, M., Lita, I., Visan, D. A., Cioc, I. B. (2009). *FPAA Based Dynamically Reconfigurable Filters for Analog Signal Processing*. Electronics, Communications and Computers Department, University of Pitesti, Romania, VXV International Symposium on Theoretical Engineering.
- KocoÅ, S., Piskorowski, J. (2013). *A concept of time-varying FIR notch filter with non-zero initial conditions based on linear Kalman notch filter prototype*. Fac. of Electr. Eng., West Pomeranian Univ. of Technol., Szczecin. 18th International Conference on Methods & Models in Automation & Robotics (MMAR).
- KocoÅ, S., Piskorowski, J. (2014). *Time-varying IIR multi-notch filter based on all-pass filter prototype*. Faculty of Electrical Engineering, West Pomeranian University of Technology, Szczecin. 19th International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR).
- KocoÅ, S., Piskorowski, J. (2015). *Time-varying FIR notch filter implementation using Raspberry Pi*. Faculty of Electrical Engineering, West Pomeranian University of Technology, Szczecin. 20th International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR).
- KocoÅ, S., Piskorowski, J. (2016). *Implementation of non-zero initial conditions for multi-notch FIR filter using raspberry Pi*. Faculty of Electrical Engineering, West Pomeranian University of Technology, Szczecin. 21st International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR).
- Kumar, M., Green, E., Roy, A de S., Bhattacharya, S. (2012). *Field Programmable Analog Array (FPAA) based Shunt Active Filter controller*. Future Renewable Electric Energy Delivery and Management (FREEDM) Systems Center, North Carolina State University. IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE).

- Northrop, R. B. (2004). *Analysis and Application of Analog Electronic Circuits to Bio-medical*.
- Okoniewski, P., Piskorowski, J. (2012). *An analytical approach to the group delay compensation of digital IIR filters*. Faculty of Electrical Engineering, West Pomeranian University of Technology, Szczecin. 17th International Conference on Methods & Models in Automation & Robotics (MMAR).
- Okoniewski, P., Piskorowski, J. (2013). *Stability analysis of linear time-varying IIR filter with equalized group delay characteristic*. Fac. of Electr. Eng., West Pomeranian Univ. of Technol. 18th International Conference on Methods & Models in Automation & Robotics (MMAR).
- Okoniewski, P., Piskorowski, J. (2014). *A graphical user interface for designing time-varying IIR filters with equalized group delay*. Faculty of Electrical Engineering, West Pomeranian University of Technology. 19th International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR).
- Okoniewski, P., Piskorowski, J. (2015). A concept of IIR filters with time-varying coefficients and equalised group delay response. *Measurement*, 60, 13-24. <http://dx.doi.org/10.1016/j.measurement.2014.09.077>. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263224114004576>
- Okoniewski, P., Piskorowski, J. (2016). "A time-varying filters approach in reducing measurement time of multiple inertial sensors", Faculty of Electrical Engineering, West Pomeranian University of Technology, Szczecin, Poland, 21st International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR).
- Orłowski, P. (2009). Linear parameter varying, finite impulse response filter design with application to reducing rise-time for rapid signal changes. *IFAC Proceedings Volumes*, 42, Issue 19, 115-119, <http://dx.doi.org/10.3182/20090921-3-TR-3005.00022>. (<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1474667015308193>)
- Paarmann, L. D. (2001). *Design and analysis of analog filters: a signal processing perspective*.
- Piskorowski, J. (2012). *Powerline interference rejection from sEMG signal using notch filter with transient suppression*. Department of Electrical Engineering, West Pomeranian University of Technology. IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings.

- Piskorowski, J., Kaszyński, R., Gutiérrez de A., M. A. y Sarmiento-Reyes, A. (2008). Group delay compensation and settling time minimization in continuous-time elliptic filters. *Proc. Mediterr. Electrotech. Conf. - MELECON, 033(2)*, 12-17.
- Piskorowski J. y Gutiérrez de A., M. A. (2010). A new concept of continuous-time narrow bandpass Q-varying filter with transient suppression. *ISCAS 2010 - 2010 IEEE Int. Symp. Circuits Syst. Nano-Bio Circuit Fabr. Syst.*, pp. 1272-1275.
- Piskorowski, J., y Kaszyński, R. (2011). Analytical synthesis of parameter-varying filter of constant component with application to switching systems. *Meas. Syst.*, 18(3), 471-480.
- Malcher, Z. Kidoń. (2009). Some Properties of FPAA-based Analog Signal Processing Applications. *IFAC Proceedings Volumes*, 42, Issue 1, 184-189, <http://dx.doi.org/10.3182/20090210-3-CZ-4002.00038>. (<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1474667016324685>).
- Morales, D. P., García, A., Castillo, E., Carvajal, M. A., Banqueri, J., y Palma, A. J. (2011). Flexible ECG acquisition system based on analog and digital reconfigurable devices. *Sensors and Actuators A: Physical*, 165, Issue 2, 261-270. <http://dx.doi.org/10.1016/j.sna.2010.10.008>. (<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924424710004425>)
- Seng Pan U, J.E. da F., y Martins, R. P. (2006). *Design of Very High Frequency Multirate Switched-Capacitor Circuit*.
- Soliman, E. A., y Mahmoud, S. A. (2011). *Tunable second order bi-quad filter using current conveyor based FPAA*. Electrical and Electronics Engineering Department, German University in Cairo. ICM Proceeding.
- Soliman, E. A., y Mahmoud, S. A. (2012). *Voltage-mode Field Programmable Analog Array using Second Generation Current Conveyor*. Electrical and Electronics Engineering Dept., The German University in Cairo. IEEE 55th International Midwest Symposium on Circuits and Systems (MWSCAS).
- Visan, D. A., Lita, I., Jurian, M., y Cioc, I. B. (2010). *Simulation and implementation of adaptive and matched filters using FPAA technology*. Electronics, Communications and Computers Department, University of Pitesti. IEEE 16th International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME).
- Wang, J., Aranovskiy, S., Alexey, A., Bobtsov, Anton A. Pyrkin, Polina A., Gritcenko. (2015). On Stability of Tunable Linear Time-Varying Band-Pass Filters. *IFAC-PapersOnLine*, 48, Issue 11, 345-347. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.09.209>. (<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896315012902>)

Control de posición automático de un cuadrucóptero como soporte en labores de monitorización, exploración y búsqueda

Edwin Alonso González Querubín

*Facultad de Ingeniería Mecatrónica, grupo de Investigaciones en Aplicaciones Mecatrónicas - GRAM, Universidad Santo Tomás, Bucaramanga, Colombia,
Correo electrónico: edwin.gonzalez@ustabuca.edu.co*

José Jorge Carreño Zagarra

*Facultad de Ingeniería Mecatrónica, grupo de Investigaciones en Aplicaciones Mecatrónicas - GRAM, Universidad Santo Tomás, Bucaramanga, Colombia,
Correo electrónico: jose.carreno01@ustabuca.edu.co*

Paolo Andrés Ospina Henao

*Físico, Departamento de Ciencias Básicas, grupo de Investigación en Ciencias Básicas y Aplicadas – GICIBAYA, Universidad Santo Tomás, Bucaramanga, Colombia,
Correo electrónico: paolo.ospina@ustabuca.edu.co*

Introducción

Un cuadricóptero o quadrotor es una aeronave, tal como, drones u objetos voladores no tripulados, es decir, pueden despegar y aterrizar en forma autónoma, por lo que son usados en la navegación de espacios pequeños o ambientes interiores, y en múltiples aplicaciones. Debido a esto los cuadricópteros han ejercido últimamente una gran importancia sobre el hombre en todos los tipos de investigación y desarrollo. Por ejemplo, el amplio campo de utilidad de vehículos de este tipo pueden ser usados en una gran número de misiones, tales como: patrullaje y reconocimiento

marítimo, evaluación y monitoreo de cultivos y ganado, apoyo en rescates y búsquedas en zonas escabrosas o apartadas, indicios de incendios, monitoreo de gasoductos y oleoductos, control fronterizo, etc.

Por otro lado, se han desarrollado aplicaciones en la industria militar de este tipo de aeronaves, pues a diferencia de los robots terrestres cuentan con óptimos resultados y con una excelente acogida, ya que no tienen las limitaciones de los robots cuando son instalados en tierra en terrenos difíciles. Este hecho nos empujó hacia el desarrollo de nuevos sistemas de movilidad y en particular al control de este tipo de aeronaves. Ahora bien, con el propósito de conseguir que estas aeronaves se desempeñen de manera automática, se necesita obtener un modelo matemático multivariable a partir de una perspectiva dinámica que permita describir de manera adecuada su comportamiento. Mediante este modelo matemático se puede controlar su orientación y posición, a través de la implementación de un algoritmo de control multivariable, que implemente una gran robustez ante incertidumbres de modelado, perturbaciones medibles y no medibles como las ocasionadas por fuerzas externas como el viento, proporcionándole la estabilidad requerida.

El aporte de este sistema controlado de manera autónoma es primordial, ya que permite que a través de la incorporación de sistemas de cámaras y de sensores se pueda ayudar en labores medioambientales, como lo son las mediciones de presión, velocidad del viento, temperatura, y humedad para diferentes análisis climáticos. En el contexto militar se puede usar en labores de detección de algún tipo de amenaza o reconocimiento de terreno. En el sector agrícola es de gran relevancia la exploración de los llamados espejos de agua y en la supervisión de cultivos.

En el contexto colombiano, esta tecnología cobra gran relevancia al usarse en labores como el conflicto armado por el que el país ha atravesado las últimas décadas. Asimismo, el cambio climático que ha causado inundaciones, incendios forestales y sequías en gran parte del territorio (recientemente en los departamentos de la Guajira y Casanare), tal vez debido al auge que ha cobrado la explotación minera y exploración de

pozos petroleros. También tiene un enorme potencial en el sector agrícola que es uno de los principales soportes de la economía del país. La poca acogida o renuencia a su uso en el país, en parte se debe quizás, al desconocimiento de su existencia o la de estas tecnologías, a la creencia de costos elevados o a sus prestaciones. Es por tal razón que en el presente proyecto de investigación se decidió ahondar aún más en este campo y fortalecer las investigaciones sobre el uso de estas aeronaves, específicamente hablando de cuadricópteros, para ser luego usados como apoyo a la solución de problemas en diversos sectores del contexto colombiano. En el año 1922 un tipo de avión que constaba de seis rotores ubicados en las puntas de una estructura con forma de “X” presentado por (M. Parker, 2006), fue desarrollado por George De Bothezat e Ivan Jerome específicamente para la Fuerza Aérea de los Estados Unidos (figura 46). Dos de sus hélices eran las encargadas de la dirección y control de inclinación-empuje. Sin embargo, este modelo tenía una baja potencia con complejidad mecánica, además de la susceptibilidad a problemas, tampoco soportaba pilotos demasiado pesados. El modelo realizó cientos de vuelos logrando una altura máxima de desplazamiento de 5 metros.

Figura 46. *Helicóptero desarrollado por George de Bothezat e Iván Jerome*



Fuente: Wikipedia Enciclopedia Libre (s.f.). De Bothezat Helicopter https://en.wikipedia.org/wiki/De_Bothezat_helicopter

En general, el diseño de estos es sencillo y están compuestos por cuatro rotores, los cuales de acuerdo con la velocidad y dirección de cada uno, se puede lograr una maniobrabilidad excelente y facilidad para su

manejo, debido a la incorporación de controles de posición y estabilidad; apuntando o con la finalidad de llegar a tener una UAV que opere o realice misiones de manera autónoma. Esto demanda de algoritmos potentes para el control de navegación (Vélez et al., 2015), detección de colisiones, seguimiento de trayectorias, tal como lo muestra en su trabajo (Al Habsi et al., 2015), que permitan realizar maniobras complicadas y en tiempo real como se demuestra en los trabajos de (Pounds et al., 2006) y (Konstantin et al., 2015). En la actualidad esta tecnología se emplea en el sector académico para estudios, tales como la robótica, teoría de control, como se muestra en la tesis doctoral (Salcedo, 2005), algoritmos de navegación y sistemas en tiempo real; en el sector militar para tareas de apoyo, reconocimiento y vigilancia, por su facilidad de llegar a partes difíciles y más aún porque nunca está en riesgo la integridad de un ser humano.

Desarrollo del capítulo

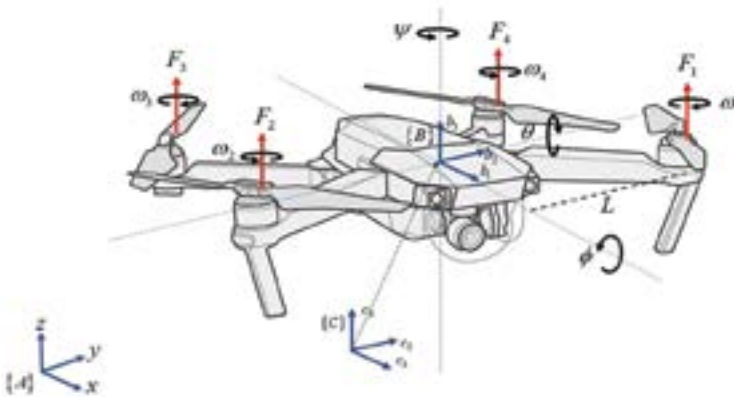
Modelado dinámico del cuadrucóptero

El modelado dinámico se basa en determinar las ecuaciones físicas de movimiento de la aeronave, obtener los parámetros del modelo e identificar la dinámica de los actuadores que son importantes en el caso de un cuadrucóptero. Este enfoque hace que sea fácil de construir modelos dinámicos de sistemas inestables, ya que no se tiene que llevar a cabo la identificación de circuito cerrado en vuelo, tal como se puede consultar en (Bouabdallah, 2007) y (Indrawati et al., 2015). Los cuadrucópteros poseen tres tipos de movimiento: cabeceo, alabeo y guiñada, o técnicamente llamados pitch, roll y yaw, respectivamente, los cuales se tratan de una representación, generalmente usada en aeronáutica, y básicamente se fundamenta en una serie de rotaciones o giros sobre los ejes de un sistema fijo (Barrientos et al., 1997).

El modelo dinámico permite describir la posición y orientación de un cuadrucóptero mediante la formulación Lagrange-Euler. El movimiento del cuadrucóptero se genera de acuerdo con la velocidad de rotación de cada uno de los cuatro motores que lo conforman. El movimiento de

alabeo (roll) ϕ , se produce al existir un desbalance entre el conjunto de fuerzas F_1, F_4 con F_2, F_3 ; el movimiento de elevación (pitch) θ , se produce al existir un desbalance entre el conjunto de fuerzas F_1, F_2 con F_3, F_4 ; finalmente, el movimiento de dirección (yaw) ψ , se produce a partir de las diferencias de torque entre cada conjunto de motores (1 y 3 que giran en sentido antihorario y 2 y 4 que giran en sentido horario). Al hacer mayores las velocidades de los motores 1 y 3 respecto a los motores 2 y 4, ocasionará un giro del cuadricóptero en sentido horario; en caso contrario el giro sería antihorario. El vector ξ , representa las velocidades lineales del centro de masa respecto al sistema A, $\xi = [\dot{x} \ \dot{y} \ \dot{z}]^T$, tal como se puede estudiar en (Mueller y D'Andrea, 2013) y (Zhang y Rabbath, 2012). Para la obtención del modelo dinámico de un cuadricóptero tipo X (dos motores traseros y dos motores delanteros), se partirá de cuatro entradas que definen la posición y orientación del cuadricóptero, divididas en una fuerza resultante F denominada empuje, y tres momentos fuerza $\tau\phi$, $\tau\theta$ y $\tau\psi$. La trama A, representa un sistema de referencia inercial, la trama B se encuentra asociada al centro de masa del UAV y su dirección cambia con este. Finalmente, el origen de la trama C coincide con el origen de la trama B, pero sus ejes se encuentran alineados con los de la trama A, es decir, nunca cambia su dirección.

Figura 47. Descripción del movimiento de un cuadricóptero



Fuente: Autores.

Sean las matrices de rotación elementales respecto a los ejes x, y y z, tal como se demuestra en (H. Goldstein, 2002)

$$\begin{aligned} R_x(\phi) &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\phi) & -\text{sen}(\phi) \\ 0 & \text{sen}(\phi) & \cos(\phi) \end{bmatrix} \\ R_y(\theta) &= \begin{bmatrix} \cos(\theta) & 0 & \text{sen}(\theta) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\text{sen}(\theta) & 0 & \cos(\theta) \end{bmatrix} \\ R_z(\psi) &= \begin{bmatrix} \cos(\psi) & -\text{sen}(\psi) & 0 \\ \text{sen}(\psi) & \cos(\psi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (1)$$

La orientación final del cuadrucóptero se puede expresar mediante tres rotaciones consecutivas, respecto a los ejes actuales de la trama móvil B, esta convención de ángulos de Euler se denomina (x, y', z'') y viene dada por: $R = R_z(\psi) * R_y(\theta) * R_x(\phi)$, (Paul Pondos et al., 2006), esto es:

$$R = \begin{bmatrix} \cos(\theta)\cos(\psi) & \text{sen}(\phi)\text{sen}(\theta)\cos(\psi) - \cos(\phi)\text{sen}(\psi) & \cos(\phi)\text{sen}(\theta)\cos(\psi) + \text{sen}(\phi)\text{sen}(\psi) \\ \cos(\theta)\text{sen}(\psi) & \text{sen}(\phi)\text{sen}(\theta)\text{sen}(\psi) + \cos(\phi)\cos(\psi) & \cos(\phi)\text{sen}(\theta)\text{sen}(\psi) - \text{sen}(\phi)\cos(\psi) \\ -\text{sen}(\theta) & \text{sen}(\phi)\cos(\theta) & \cos(\phi)\cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (2)$$

Donde R representa la orientación de la trama B respecto a la trama C. La fuerza F_i y momento τ_i que entrega cada motor son proporcionales al cuadrado de su velocidad angular ω_i y vienen dados por

$$\begin{aligned} F_i &= k\omega_i^2 \\ \tau_i &= b\omega_i^2 \end{aligned} \quad (3)$$

Las constantes k, b son los coeficientes de empuje y arrastre de cada motor. La entrada del sistema F denominada empuje, que apunta en la dirección z del sistema B, es el resultado de la suma de todas las fuerzas ejercidas por cada motor:

$$F = \sum_{i=1}^4 k\omega_i^2 \quad (4)$$

Esta fuerza representada en el sistema C, se obtiene como:

$$RU_1 = \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{bmatrix} \quad (5)$$

Las entradas relacionadas con los momentos ejercidos sobre el UAV en cada eje del sistema B se obtienen de la siguiente forma:

$$\tau_\phi = F_1L + F_4L - F_2L - F_3L = kL(\omega_1^2 + \omega_4^2 - \omega_2^2 - \omega_3^2) = U_2$$

$$\tau_\theta = F_3L + F_4L - F_1L - F_2L = kL(\omega_3^2 + \omega_4^2 - \omega_1^2 - \omega_2^2) = U_3$$

$$\tau_\psi = \sum_{i=1}^4 \tau_i = b(\omega_2^2 + \omega_4^2 - \omega_1^2 - \omega_3^2) = U_4 \quad (6)$$

$$i = 1$$

Mediante el formalismo de Euler-Lagrange se procede a obtener el lagrangiano del sistema, el cual toma la forma

$$\mathcal{L} = \frac{1}{2}m\dot{\xi}^T \dot{\xi} + \frac{1}{2}\omega^T J\omega - mgz \quad (7)$$

Cuyas ecuaciones de movimiento serán,

$$T_i = \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial q_i} \quad (8)$$

Donde, $T = [F_x F_y F_z \tau_\phi \tau_\theta \tau_\psi]^T$ es el vector de fuerzas y momentos, $q = [x y z \phi \theta \psi]^T$, el vector de coordenadas generalizadas y J , la matriz de momentos de inercia. Debido a que se busca que los ángulos ϕ, θ, ψ son cercanos a cero, el modelo dinámico en la parte rotacional se puede simplificar aplicando el teorema de ángulos pequeños o pequeñas oscilaciones (Bouktir, Haddad y Chettibi, 2008), de manera que el modelo dinámico simplificado será:

$$\ddot{x} = \left(\frac{C_\phi S_\theta C_\psi + S_\phi S_\psi}{m} \right) U_1$$

$$\ddot{y} = \left(\frac{C_\phi S_\theta S_\psi - S_\phi C_\psi}{m} \right) U_1$$

$$\ddot{z} = -g + \left(\frac{C_\phi C_\theta}{m} \right) U_1$$

$$\ddot{\phi} = \left(\frac{I_{yy} - I_{zz}}{I_{xx}} \right) \dot{\theta} \dot{\psi} + \left(\frac{1}{I_{xx}} \right) U_2$$

$$\ddot{\theta} = \left(\frac{I_{zz} - I_{xx}}{I_{yy}} \right) \dot{\phi} \dot{\psi} + \left(\frac{1}{I_{yy}} \right) U_3$$

$$\ddot{\psi} = \left(\frac{I_{xx} - I_{yy}}{I_{zz}} \right) \dot{\phi} \dot{\theta} + \left(\frac{1}{I_{zz}} \right) U_4$$

$$U_1 = k(\omega_1^2 + \omega_2^2 + \omega_3^2 + \omega_4^2)$$

$$U_2 = kL(\omega_1^2 + \omega_4^2 - \omega_2^2 - \omega_3^2)$$

$$U_3 = kL(\omega_3^2 + \omega_4^2 - \omega_1^2 - \omega_2^2)$$

$$U_4 = b(\omega_2^2 + \omega_4^2 - \omega_1^2 - \omega_3^2) \quad (9)$$

El anterior sistema está subactuado y contiene cuatro entradas (U_1, U_2, U_3, U_4) y seis salidas ($x, y, z, \phi, \theta, \psi$).

Linealización

Dado que el modelo anteriormente descrito es de naturaleza no lineal, es necesaria su linealización [17] en torno a un punto de operación determinado para proceder a la implementación del sistema de control en espacio de estados. Definiendo el vector de estados como $X = [x \ \dot{x} \ y \ \dot{y} \ z \ \dot{z} \ \phi \ \dot{\phi} \ \theta \ \dot{\theta} \ \psi \ \dot{\psi}]^T$ y el punto de operación para el UAV (Salcedo, 2005).

$$X_0 = [x_0 \ y_0 \ z_0 \ 000000]^T$$

$$U_0 = [U_1 \ U_2 \ U_3 \ U_4]^T = [mg \ 0000]^T \quad (10)$$

En este punto de equilibrio, tanto las componentes de orientación como de desplazamiento lineal del vector de estados no producen cambios. El modelo final en el espacio de estados continuo es de la forma:

$$\dot{X} = A \cdot X + B \cdot U + K \quad (11)$$

$$Y = C \cdot X$$

Donde K , es un término constante en función de la gravedad, las matrices jacobianas A , B del modelo se generan aplicando series de Taylor en el punto de equilibrio, esto es

$$A = \left. \frac{\partial f(x, u)}{\partial x} \right|_{x_0, u_0} \quad B = \left. \frac{\partial f(x, u)}{\partial u} \right|_{x_0, u_0} \quad (12)$$

Finalmente, las estructuras de las matrices del modelo linealizado toman la forma:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & g & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -g & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1/m & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1/I_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1/I_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/I_{zz} \end{bmatrix} \quad K = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -g \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

Control predictivo basado en el modelo dinámico

El control predictivo basado en modelo (o MPC, por sus siglas en inglés) es una poderosa técnica de control que ha encontrado mucha aceptación, tanto en aplicaciones industriales como en el mundo académico. Este éxito se debe principalmente al hecho de ser útil tanto en sistemas de una sola variable como en sistemas multivariables, por considerar las restricciones del sistema de control y compensar intrínsecamente los

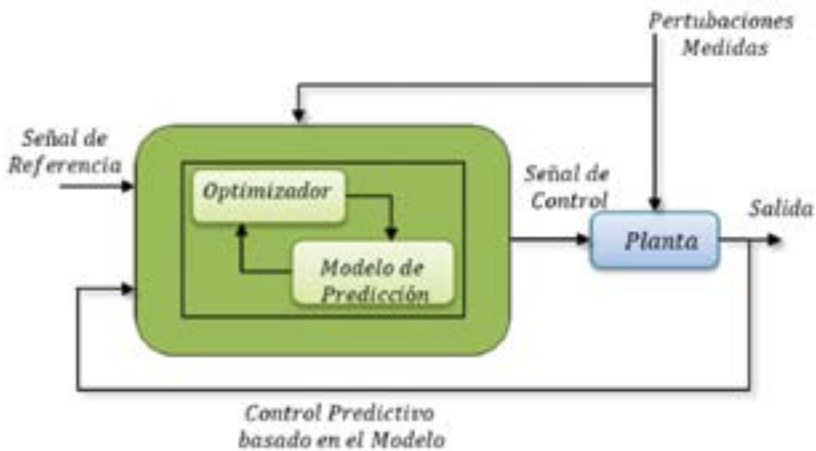
retardos de tiempo del proceso (Craig, 2006). Los algoritmos de control predictivo proponen la minimización de distintas funciones objetivo para la obtención de la ley de control. Con ese problema de optimización se quiere garantizar un seguimiento de la referencia y penalizar la acción de control requerida (figura 48). La expresión general de dicha función objetivo está dada por (González, 2011):

$$J(N_1, N_2, N_u) = \sum_{j=N_1}^{N_2} \delta(j) [\hat{y}(t+j|t) - w(t+j)]^2 + \sum_{j=1}^{N_u} \lambda(j) [\Delta u(t+j-1)]^2 \quad (14)$$

donde los horizontes mínimo y máximo de predicción y de control son N_1 , N_2 y N_u , respectivamente. Mientras que los coeficientes $\delta(j)$ y $\lambda(j)$ son secuencias que ponderan el comportamiento futuro en términos del error de seguimiento y el esfuerzo de control, respectivamente. Por lo general, los algoritmos de control predictivo tienen en cuenta las restricciones reales del proceso, razón por la cual han tenido gran éxito y aceptación en la industria. Comúnmente se consideran los límites mínimo y máximo de la amplitud y razón de cambio de la señal de control y los límites en la salida del sistema:

$$u_{\min} \leq u(k) \leq u_{\max}; \Delta u_{\min} \leq \Delta u(k) \leq \Delta u_{\max}; y_{\min} \leq y(k) \leq y_{\max} \quad (15)$$

Figura 48. Esquema de control predictivo basado en modelo



Fuente: Autores.

Formulación en espacio de estados

Esta estrategia de control requiere de un modelo discreto del sistema a controlar de la siguiente manera (Barrientos et al., 1997)

$$\begin{aligned}x(t+1) &= Ax(t) + Bu(t) \quad (16) \\y(t) &= Cx(t)\end{aligned}$$

Para el caso SISO, $y(t)$ y $u(t)$ son escalares, $x(t)$ es el vector de estados. En el caso multivariable el vector de entradas $u(t)$ es de dimensión m , mientras que el vector de salidas y es de dimensión n . Para el diseño del control predictivo es necesaria la obtención de un modelo incremental tal como se puede estudiar en (Abdolhosseini, Zhang y Rabbath, 2012), considerando la variable independiente como los incrementos $\Delta u(t)$ en las entradas $u(t)$. Esta formulación se realiza aplicando la relación $\Delta u(t) = u(t) - u(t-1)$, esto es

$$\begin{aligned}\begin{bmatrix} x(t+1) \\ u(t) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} A & B \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t) \\ u(t-1) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ I \end{bmatrix} \Delta u(t) \\ \bar{x}(t+1) &= M\bar{x}(t) + N\Delta u(t) \quad (17)\end{aligned}$$

La salida del modelo incremental tomará la forma,

$$\begin{aligned}y(t) &= \begin{bmatrix} C & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t) \\ u(t-1) \end{bmatrix} \\ y(t) &= Q\bar{x}(t) \quad (18)\end{aligned}$$

Con base en el modelo incremental se puede realizar una predicción de las salidas del sistema a lo largo de un horizonte de predicción N_p y horizonte de control N_c , se definen como sigue

$$y = \begin{bmatrix} \hat{y}(t+1|t) \\ \hat{y}(t+2|t) \\ \vdots \\ \hat{y}(t+N_p|t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} QM\hat{x}(t) + QN\Delta u(t) \\ QM^2\hat{x}(t) + \sum_{i=0}^1 QM^{1-i}N\Delta u(t+i) \\ \vdots \\ QM^{N_p}\hat{x}(t) + \sum_{i=0}^{N_p-1} QM^{N_p-1-i}N\Delta u(t+i) \end{bmatrix} \quad (19)$$

El anterior modelo de forma matricial toma la forma

$$y = F\hat{x}(t) + H\Delta u \quad (20)$$

De este modelo de predicción matricial, el término $F\hat{x}(t)$ se denomina respuesta libre y se supone conocida, dado que depende únicamente del estado actual. $H\Delta u$, se conoce como la respuesta forzada y depende de acciones de control futuras, las cuales no se conocen.

Función de coste

Para esto se calcula el error de predicción restando las predicciones de la salida a la trayectoria de referencia, con lo cual resulta:

$$\begin{bmatrix} E_P(k+1|k) \\ E_P(k+2|k) \\ E_P(k+3|k) \\ \vdots \\ E_P(k+N_P|k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R(k+1) \\ R(k+2) \\ R(k+3) \\ \vdots \\ R(k+N_P) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_P(k+1|k) \\ Y_P(k+2|k) \\ Y_P(k+3|k) \\ \vdots \\ Y_P(k+N_P|k) \end{bmatrix} \quad (21)$$

La función de coste tendrá la siguiente estructura:

$$\min_{\Delta u} J = \min_{\Delta u} [E_P^T \alpha E_P + \Delta u^T \lambda \Delta u] \quad (22)$$

Donde las matrices α y λ contienen los coeficientes que ponderan los errores de predicción y el esfuerzo de control respectivamente. Sus estructuraciones son las siguientes:

$$\alpha = \begin{bmatrix} \alpha_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \alpha_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \alpha_{N_P} \end{bmatrix} \quad \lambda = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \lambda_{N_C} \end{bmatrix}$$

Mediante la reformulación de la función de coste podemos obtener la ley de control mediante programación cuadrática, y toma la forma:

$$J_{QP} = 0.5 \Delta u^T H_{QP} \Delta u + C_{QP}^T \Delta u \quad (24)$$

Donde,

$$\begin{aligned} H_{QP} &= H^T \alpha H + \lambda \\ C_{QP}^T &= -D^T \alpha H \end{aligned} \quad (25)$$

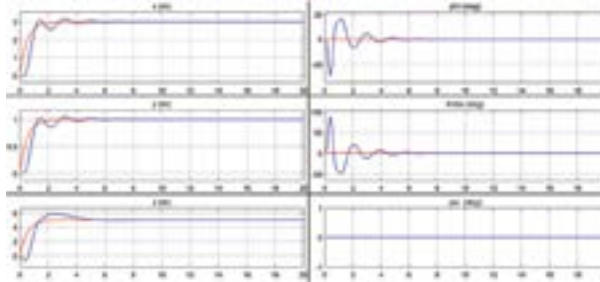
Se puede obtener la ley de control que satisfaga las restricciones, bien sea en las variables manipuladas como controladas del sistema, estas deben ser expresadas en forma de desigualdad matricial

$$A \Delta u \leq B \quad (26)$$

Validación de técnicas de control predictivo

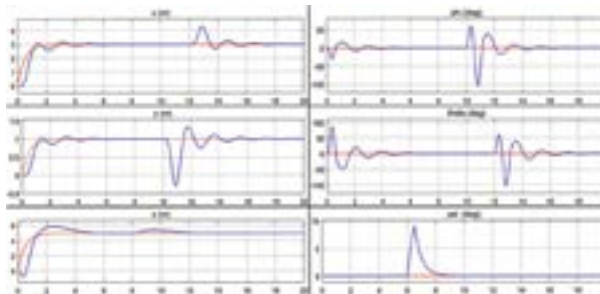
Con base en la representación en espacio de estados del sistema linealizado se diseña un controlador predictivo y se realiza su validación sin y en presencia de perturbaciones. El objetivo de control es garantizar el seguimiento de referencia de la posición del cuadricóptero aún en presencia de fuertes perturbaciones, debidas a ráfagas de viento o variaciones en la carga, y regular la orientación del vehículo. En la figura 49 se presenta el seguimiento de referencias de la aeronave con el controlador predictivo diseñado. En la simulación se puede validar que para un cambio de referencia en las coordenadas X, Y y Z el sistema de control hace el seguimiento de manera rápida y precisa (todas las coordenadas lo realizan cerca de 4 segundos). Por su parte, los ángulos θ y ϕ , aunque inicialmente presentan un fuerte sobre-impulso, rápidamente recuperan su posición de equilibrio, y el ángulo ψ no sufre cambios apreciables. Con el fin de validar el desempeño del sistema de control en presencia de perturbaciones, se inyectan señales de pulso de duración de 1 segundo a las variables manipuladas, esto es, a la fuerza de empuje y los tres momentos fuerza. Aunque dichas señales se convierten en perturbaciones que intentan afectar de manera negativa el desempeño de la aeronave estas son mitigadas rápidamente por el sistema de control, como se puede verificar en la figura 50.

Figura 49. Seguimiento de referencias de la aeronave en ausencia de perturbaciones (la señal roja es la referencia mientras la azul es la señal medida)



Fuente: Autores.

Figura 50. Seguimiento de referencias de la aeronave en presencia de perturbaciones (la señal roja es la referencia mientras la azul es la señal medida)



Fuente: Autores.

Diseño de una interfaz de usuario y programación del dispositivo para realizar un control y monitoreo de variables de interés de manera remota

El sistema de control requería de una interfaz de usuario intuitiva y de simple instalación, razones por las cuales se decidió realizar una interfaz en los lenguajes HTML5 y JavaScript, para acceder a la interfaz a través del navegador de cualquier equipo que pudiera conectarse con la aeronave vía WiFi. La interfaz debía permitir una comunicación doble vía en

tiempo real o a una gran velocidad, de manera que fue necesario el uso de sockets para enviar los datos entre los distintos elementos que hacían parte del sistema: interfaz de usuario, aeronave, controlador. Usando las librerías de Socket.IO fue posible establecer dicha comunicación para transmitir la información necesaria. La interfaz permite visualizar, permite introducir las coordenadas de referencia del cuadricóptero y visualizar el seguimiento de la trayectoria que sigue el vehículo aéreo no tripulado. Además, la herramienta permite introducir parámetros del vehículo, como su masa, constantes de inercia y longitud, entre otros, y parámetros de diseño del controlador predictivo, como período de muestreo y los valores de los pesos de la función objetivo que usa el controlador predictivo.

Conclusiones

En este trabajo se presentó el modelado dinámico y control de un cuadricóptero en configuración en X. Su modelo dinámico se obtuvo mediante la formulación LagrangeEuler y sus parámetros se extrajeron a partir de su modelo CAD. Este modelo fue linealizado con el fin de aplicar una estrategia de control predictivo en espacio de estados, para el control de este sistema subactuado bajo la influencia de perturbaciones y errores de modelado.

El cálculo del Lagrangiano del sistema resulta ser intuitivo y sencillo de hallar, además las ecuaciones de movimiento se obtienen con derivadas parciales, algo que resulta ser básico para profesionales en ciencias puras e ingeniería.

Linealizar alrededor de un punto de operación determinado permite obtener un modelo lineal representativo y necesario para la estrategia de control.

El control predictivo resulta muy útil en aplicaciones de procesos con dinámicos complejos que involucran no linealidades, inestabilidades, acoplamientos entre variables, sensibilidad a perturbaciones o incluso restricciones; además, presenta facilidad para su extensión del caso monovariable al caso multivariable.

La complejidad del desarrollo de todo el proyecto en el lenguaje de implementación C++ fue mucho mayor al esperado. Al tener un grado de innovación considerable, no existe mucha documentación al respecto y se necesitó de la ayuda de la comunidad académica internacional, a través de foros técnicos, la cual muchas veces no era inmediata.

El auge de los drones y vehículos no tripulados ha generado la creación de diversas herramientas y librerías que ayudan en la investigación y la ciencia para innovar en este campo, un ejemplo de ellos es la librería Ardupilot.

La implementación de una técnica de control predictivo en una aeronave no tripulada tiene una complejidad alta, es necesario contar con el apoyo de la comunidad internacional y fabricantes de los dispositivos para realizar un trabajo tan específico. Esta fue una de las limitantes del proyecto, ya que en varias ocasiones se hizo uso de los foros técnicos de los fabricantes y desarrolladores y la respuesta no fue inmediata.

La implementación del controlador en la aeronave se validará en una segunda fase del proyecto.

Referencias

- Abdolkhosseini, M., Zhang, Y. M. y Rabbath, C. A. (2012). An Efficient Model Predictive Control Scheme for an Unmanned Quadrotor Helicopter. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*. 2012.
- Alderete, T. S. (s.f.). *Simulator aero model implementation*. NASA Ames.
- Amelin, K., Tomashevich, S., Andrievsky, B. (2015). Recursive Identification of Motion Model Parameters for ultralight UAV. *IFAC-PapersOnLine* 48-11, 233-237.
- Barrientos, A., Peñin, L., Balaguer, C. y Aracil, R. (1997). *Fundamentos de Robótica*. MacGraw Hill, Interamericana de Madrid.
- Barták, R., Hraško, A., y Obdržálek, D. (2014). *A Controller for Autonomous Landing of AR.Drone*. Control and Decision Conference (2014 CCDC), The 26th Chinese.
- Bouabdallah, S., Murrieri, P., y Siegwart, R. (2004, April). Design and Control of an Indoor Micro Quadrotor. *Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation*.

- Bouabdallah. (2007). *Design and control of quadrotors with application to autonomous flying*. (Tesis doctoral, École Polytechnique Fédérale de Lausanne).
- Bouktir, Y., Haddad, M., y Chettibi, T. (2008). *Trajectory planning for a quadrotor helicopter*. 16th Mediterranean Conference on Control and Automation Congress Centre, Ajaccio, France, June 25-27.
- Brown, H., Johnston, N. (1999). *Curtiss-Wright Corporation Records. National Air And Space Archives*. Smithsonian Institution.
- Byung Hyung Kim, Minho Kim, Sungho Jo. (2014, 1 de agosto). Quadcopter flight control using a low-cost hybrid interface with EEG-based classification and eye tracking. *Computers in Biology and Medicine*, 51, 82-92.
- Campos, D., e Isaza, J. F. (2002). *Prolegómenos a los sistemas dinámicos*. Ediciones Universidad Nacional de Colombia. (Primera ed.).
- Craig, J. J. (2006). *Robótica*. (Tercera edición). Prentice Hall.
- Fridland, B. (2005). *Control System Design*.
- García, L.R., Dzul, A. E., Lozano, R., y Pégard, C. (2013). *Quad Rotorcraft Control*. Springer-Verlag London.
- Goldstein, H., Poo le, C., y Safko, J. (2002). *Classical Mechanics* (3rd. ed.). Addison-Wesley.
- González, E. (2011). *Algoritmos de control predictivo multivariable para procesos con dinámicas rápidas. Aplicación al control de un sistema de motores acoplados*. (Tesis de máster, Politécnica de Valencia).
- Indrawati, V., Prayitno, A., Utomo, G. (2015). *Comparison of Two Fuzzy Logic Controller Schemes for Position Control of AR.Drone*. 7th International Conference on Information Technology and Electrical Engineering.
- Lofberg, J. (s.f.). Minimax Approaches to Robust Model Predictive Control. *Linköping Studies in Science and Technology. Dissertations*, No. 812.
- López-Suspes, F., y González, G.A. (2011). *Dinámica de partículas en campos gravitacionales axialmente simétricos*. (Tesis doctoral, Escuela de Física, Facultad de Ciencias, Universidad Industrial de Santander).
- Luukkonen, T. (2011, agosto). *Modelling and control of quadcopter. Independent research project in applied mathematics*. School of Science, Aalto University. M. Navabi a, H. Mirzaei b. Robust Optimal Adaptive Trajectory Tracking Control of Quadrotor Helicopter. *Latinoamerican Journal of Solids and Structures*.
- Maciejowski, J.M. (2002). *Predictive Control with Constraints*. Prentice Hall.

- Marion, J. (1995). *Dinámica clásica de las partículas y sistemas*. (2ª ed.). Editorial Reverté.
- Mayne, D. (2005, April 4). *Robust Model Predictive Control. Colloquium on Predictive Control*. University of Sheffi.
- Mohammad, Z., Mohammad, N., y Mohammad, Z. (2002, 25 de abril). *Redesign Of De Bothezat Helicopter: The Way Forward for The Rotorcraft Industry*. American Institute Of Aeronautics And Astronautics.
- Moses Bangura, Robert Mahony. Real-time Model Predictive Control for Quadrotors. Proceedings of the 19th World Congress. International Federation of Automatic Control, Cape Town, South Africa. August 24-29, 2014.
- Mueller, M. W. y D'Andrea, R. (2013). A model predictive controller for quadcopter state interception. 2013 European Control Conference (ECC), July 17-19, 2013, Zürich, Switzerland.
- Olfati-Saber, R. (s.f.). *Nonlinear Control of Underactuated Mechanical Systems with Application to Robotics and Aerospace Vehicles*. (Tesis doctoral. Massachusetts Institute of Technology).
- Parker, M., Robbiano, C., y Bottorf, G. (2006). *Quadcopter*. Department of Electrical and Computer Engineering. Colorado State University.
- Pounds, P. Mahony, R. E., Corke, P. I. (2006). *Modelling and control of a quad-rotor robot*. ResearchGate. Diciembre de 2006.
- Pounds, P., Mahony, R., y Corke, P. (2006). Modelling and control of a quad-rotor robot. In *Proceedings Australasian Conference on Robotics and Automation 2006*. Australian Robotics and Automation Association Inc.
- Raffo, G., Ortega, M., Rubio, F. (2009). An Integral Predictive/nonlinear H infinity Control Structure for a Quadrotor Helicopter. *Automatica*, vol. 46.
- Saha, K. (2008). *Introducción a la robótica*. (Primera edición). McGraw-Hill.
- Salcedo, J.V. (2005). *GPCs en espacio de estados para el control de sistemas no lineales*. (Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Valencia).
- Sanchis, J. (2002). *GPC mediante descomposición en valores singulares (SVD). Análisis de Componentes Principales (PCA) y criterios de selección*. (Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Valencia).
- Vélez, P., Certad, N., Ruiz, E. (2015). *Trajectory generation and tracking using the AR. Drone 2.0 quadcopter UAV*. 2015 12th Latin American Robotics Symposium and 2015 Third Brazilian Symposium on Robotics.

Calidad en tratamientos de ortodoncia en Clínicas Universidad Santo Tomás, según métricas Lean Six Sigma

Frank Delgado Moreno

*Facultad de Ingeniería Industrial, grupo de Investigación en Calidad y Productividad -
CAIPRO, Universidad Santo Tomás, Bucaramanga, Colombia,
Correo electrónico: Frank.delgado@ustabuca.edu.co*

Ethman Ariel Torres Murillo

*Facultad de Odontología, grupo de Investigación Salud Integral Bucal - SIB,
Universidad Santo Tomás, Bucaramanga, Colombia,
Correo electrónico: Ethman.torres@ustabuca.edu.co*

Introducción

En los últimos años, la competitividad en el sector salud, incluyendo la ortodoncia, busca mejorar los estándares de calidad; ofreciendo tratamientos con mejores resultados en estética, función y estabilidad, esto se ha basado en la filosofía que Porter y Teisberg (2004) denominaron: centros de excelencia y que tiene como estrategia el mejorar la calidad, alcanzando alta competitividad y la permanencia en el mercado. La Universidad Santo Tomás, como centro formador de talento humano, busca promover altos estándares de calidad y competitividad, y alineada con estándares internacionales que fomentan programas de residencia en ortodoncia con excelencia, como el propuesto por Allareddy, Shin, Marshall y Southrad (2019), establece como uno de sus objetivos el hacer un seguimiento y programa de control de la calidad de sus tratamientos;

desarrolla este trabajo en el año 2018 mediante la convocatoria interna institucional para conocer los resultados de calidad en los tratamientos de Ortodoncia realizados en la clínica de posgrado, utilizando los parámetros del Objective Grading System (OGS) del American Board of Orthodontic (ABO), propuesto por Casko et al. (1998). Los resultados de calidad se analizan siguiendo la metodología convencional y también por las métricas de Lean Six Sigma, debido a que en la actualidad se desconoce el nivel de calidad de los resultados expresados por el OGS; Lean Six Sigma es una metodología de ingeniería industrial y que en salud busca establecer niveles de competitividad basados en calidad.

El (OGS) publicado por Casko et al. (1998) y propuesto por la (ABO) es una herramienta reportada por varias universidades en el mundo para medir la calidad estática en modelos y radiografías de tratamientos finalizados de ortodoncia. La revisión sistemática y meta-análisis publicada por Papageorgiou, Hochli y Eliades (2017) describe 34 estudios que han utilizado esta metodología de evaluación de calidad con un promedio de OGS para 6207 pacientes de 27.9 puntos; los resultados varían para cada centro; determinados muchas veces por la precisión y metodología de reproducibilidad interexaminador reportada; no se encuentra en esta revisión una asociación significativa entre los resultados oclusales y la duración del tratamiento o estabilidad; pero sí muestra una heterogeneidad considerable de estudios y reafirma este método de evaluación como una herramienta de calidad válida para mejora de resultados; igualmente, expresa la necesidad de estudios prospectivos en las escuelas de formación universitaria con una mayor rigurosidad metodológica de los estudios. En el campo internacional esta metodología de estudio de la calidad se ha replicado en varias universidades como lo reportado por Campbell, Roberts, Hartsfield y Rong Qi (2007) en la universidad de Indiana; Cansunar y Uysal (2014) universidad de Izmir, Turquía; Yang-Powers, Sadowsky, Rosenstein y Begole (2002) universidad de Illinois; Yinn Song et al. (2013) universidad de Pekín; y Santiago y Martínez (2012) universidad de Puerto Rico. A nivel Colombia se han publicado los trabajos de Barbosa-Lis et al.

(2014) y Carvajal-Flores, Barbosa-lis, Zapata-noreña, Marín-Velásquez y Afanador-Bayona (2016). Universidad de Antioquia; además del trabajo de la Universidad de Manizales de Barrera, Meza y Herrera (2014). Al no tener un reporte de esta calidad en los tratamientos finalizados por los residentes de la Universidad Santo Tomás, se hace pertinente el desarrollo del trabajo en las clínicas del Posgrado de Ortodoncia de la Universidad Santo Tomás.

Una de las metodologías empleadas y certificadas a nivel mundial para investigar la calidad de los procedimientos en el sector salud, como lo reporta Deblois y Lepanto (2016), es la metodología Lean Six Sigma; esta consta de 5 fases: Definición, Medición, Análisis, Mejoramiento y Control; ha mostrado ser una estrategia adecuada en la búsqueda de mejorar el servicio a los pacientes y no se han encontrado reportes de su uso en el área de la ortodoncia; por lo que esta publicación es pionera con esta metodología en el área de la calidad en ortodoncia. Varios centros hospitalarios a nivel mundial la emplean con regularidad, mostrando mejoras en calidad de procedimientos y cambios en la estructura de las organizaciones, como lo reportado por van Leijen-Zeelenberg et al. (2016). Se ha demostrado esta metodología como una de las más indicadas para evaluar y controlar la calidad de los procedimientos en salud, y la plantea como una necesidad para inducir futuros cambios al interior de las organizaciones. Ahmed, Manaf e Islam (2013) plantean esta metodología como la mejor opción para evaluar la calidad en los servicios de salud, por las repercusiones en el servicio a los pacientes y la mejora en la competitividad.

En razón a las anteriores formulaciones se buscó con este trabajo dar respuesta a la siguiente pregunta: ¿Cuál es el resultado del análisis de la calidad en los pacientes finalizados en el Posgrado de Ortodoncia de la Universidad Santo Tomás Seccional Bucaramanga, en el periodo de febrero a junio 2018, que se evaluaron usando la metodología OGS de la BOARD y las métricas de Lean Six Sigma?

Metodología

Diseño de estudio: Estudio observacional descriptivo y transversal bajo las directrices de la declaración de la iniciativa STROBE y de investigación tipo cualitativa.

Contexto: La muestra se tomó a partir de una población de 960 pacientes activos a febrero 2018 en las clínicas de ortodoncia de la Universidad Santo Tomás, Campus Floridablanca; 90 pacientes cumplían con el criterio de inclusión de ser mayor de 12 años de edad y haber terminado el tratamiento de ortodoncia en un periodo no mayor a tres meses desde febrero 2018 a junio 2018, se excluyeron del estudio 30 pacientes de la clínica de tratamiento temprano y que necesitaban tratamientos adicionales de cirugía maxilofacial o rehabilitación oral; 15 pacientes no accedieron a participar en la investigación o no fueron a tomar los modelos.

Tamaño muestra: Muestreo a conveniencia: 45 pacientes, 30 de sexo femenino y 15 de sexo masculino; con una edad promedio de 21.44 (D.E 9.09) años, a estos pacientes se les tomó una radiografía panorámica, modelos de estudio y se firmó un consentimiento informado.

Evaluación de la calidad de los modelos: Se realizó un análisis estático de modelos y radiografía panorámica, aplicando los criterios del OGS: alineación, rebordes marginales, inclinación buco lingual, relaciones oclusales, contactos oclusales, sobre mordida horizontal, contactos interproximales y angulación de la raíz. Los resultados finales del análisis de modelos y de radiografías panorámicas se agruparon siguiendo la guía del OGS; los puntajes de 20 o menos se consideraron excelentes, entre 20 y 30 se consideraron aceptables y puntajes superiores a 30, menos que aceptables.

Duración del tratamiento: Se tomó el dato de la historia clínica y se cuantificó en meses.

Principios éticos: Este trabajo se ajustó a la normatividad colombiana según la Resolución 008430 del 4 octubre 1993, por la cual se establecen las normas científicas, técnicas y administrativas para la investigación en salud. Se calificó como una “investigación sin riesgo”, debido a que se utilizaron registros tomados previamente. Se llenaron los consentimientos informados respectivos y se presentó al Comité de Ética de la entidad.

Métodos estadísticos: Los resultados de la evaluación de los modelos fueron evaluados por frecuencias absolutas simples y relativas y expresadas en porcentajes. Adicionalmente se evaluó la calidad de modelos mediante la cuantificación de métricas de Lean Six Sigma (niveles sigma), los niveles sigma fueron comparados con la tabla 3 de estándares de calidad que aplica esta metodología

Tabla 3. *Asociación de los niveles sigma con desempeño competitivo de las empresas*

Nivel Sigma	Defectos por millón de oportunidades (DPMO)	Costo de calidad
2	308357 - Compañías no competitivas	No aplicable
3	66807	25 – 40*
4	6210 - Promedio de la industria	15 – 25*
5	233	5-15*
6	3,4 Clase mundial	< 1*

Nota: * = % de las ventas. DPMO = Defectos por millón de oportunidades. Fuentes: O’Rourke (2005).

En la tabla 3 se observa que el nivel sigma 2 pertenece a compañías no competitivas, y el nivel 6 pertenece a compañías con calidad de clase mundial.

Resultados

Los resultados generales de evaluación de los 45 modelos y radiografías nos mostraron que la edad promedio de la muestra fue de 21.44 (DE 9.09) años, con un promedio de tratamiento de 32.29 (DE 4.98) meses de duración. En la evaluación de los modelos según OGS se obtuvo un promedio de 26.11 (DE 9.19) defectos, que según la clasificación sugerida por la ABO correspondería a 12 casos de calificación excelente 26.7% de la muestra estudiada, 18 casos como aceptables, 40% de la muestra y 15 casos como deficientes, 33.3% muestra total de estudio.

Para realizar las mediciones de modelos y radiografías fue necesario previamente determinar la concordancia entre el Inspector (ortodoncista) – modelo – gage (OGS), para lo cual se utilizó el método Gage R&R para atributos, como fue propuesto en la investigación. La tabla 4 muestra las medidas estandarizadas del estadístico Kappa para comparación de los resultados de la medición.

Tabla 4. *Valoración del coeficiente Kappa*

Coeficiente Kappa	Fuerza de concordancia
0,00	Pobre (Poor)
0,01 - 0,20	Leve (Slight)
0,21 - 0,40	Aceptable (Fair)
0,41 - 0,60	Moderada (Moderate)
0,61 - 0,80	Considerable (Substantial)
0,81 - 1,00	Casi perfecta (Almost perfect)

Fuente: Landis y Koch, 1977.

La tabla 4 muestra que preferiblemente son aceptados los resultados de concordancia de 0, 21 a 1,00 donde el ideal es entre 0,81 y 1,00 de concordancia. Los resultados de la concordancia Inspector - Modelo - Gage son presentados en la tabla 5.

Tabla 5. *Exactitud y la precisión del sistema: inspector - modelo - gage molar por medio de un estudio Gage R&R para atributos*

Característica	Precisión	Kappa	Exactitud	Kappa
Alineación	1	Casi perfecta	0,70	Considerable
Rebordes marginales	1	Casi perfecta	0,84	Considerable
Inclinación Bucolingual	0,86	Considerable	0,93	Considerable
Contactos oclusales	1	Casi perfecta	0,70	Considerable
Relación oclusal	1	Casi perfecta	1	Casi perfecta
Overjet	0,86	Considerable	0,93	Casi perfecta
Contactos interproximales	100% Concordancia	N/A	100% Concordancia	N/A
Angulación de la raíz	1	Casi perfecta	0,90	Casi perfecta

Fuente: Autores.

La tabla 5 muestra la relación de todas las características del estudio respecto al tratamiento de ortodoncia, la relación en precisión fue casi perfecta para todas las características y con respecto a exactitud estuvo entre considerable y casi perfecta; es decir, la relación Inspector - Modelo - Gage fue aprobada para tomar todas las mediciones a posteriores.

Se presentan los resultados según los niveles sigma para cada una de las 8 características analizadas según el OGS.

En la figura 51 se observa en “Summary Status” el nivel de calidad sigma de 1,13; para la característica de alineación dental, los demás aspectos del análisis no muestran situaciones indeseables con respecto a esta característica.

La figura 52 muestra un nivel de calidad de 0,508 sigmas para el proceso de Rebordes Marginales; igualmente, se observa inestabilidad en la observación 3.

En la figura 53 se observa un nivel de calidad de 0,633 para el proceso de inclinación Bucolingual, y las observaciones 17 y 33 justo en el lími-

te inferior de control, el cual significa una advertencia de inestabilidad del proceso.

Figura 51. *Determinación de los niveles sigma para alineación*

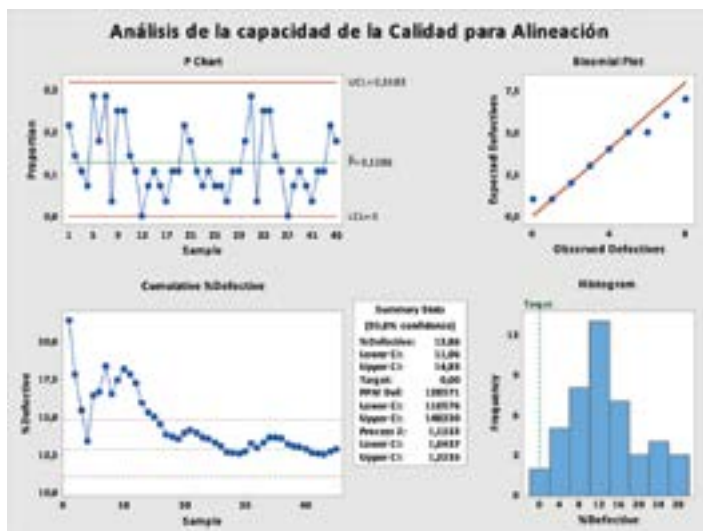


Figura 52. *Determinación de los niveles sigma para rebordes marginales*

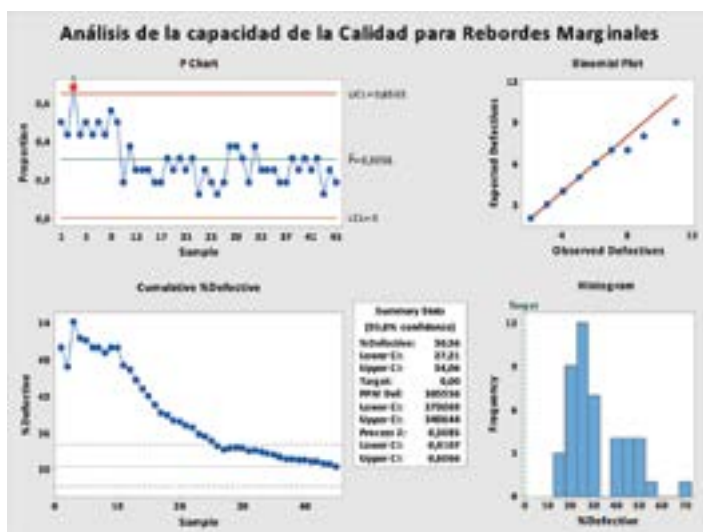
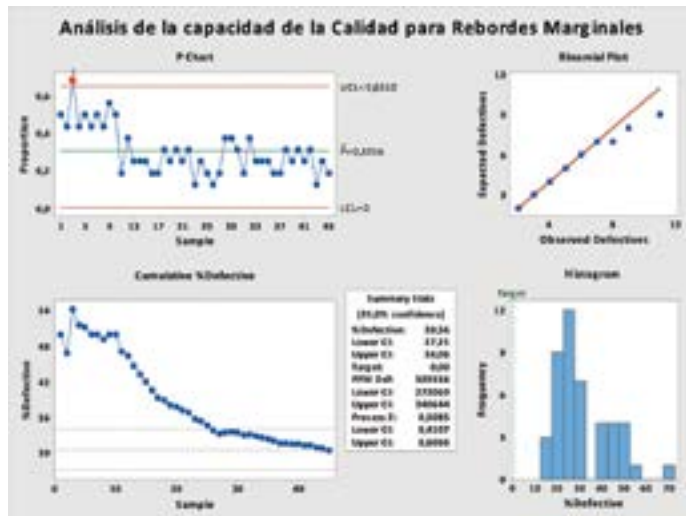
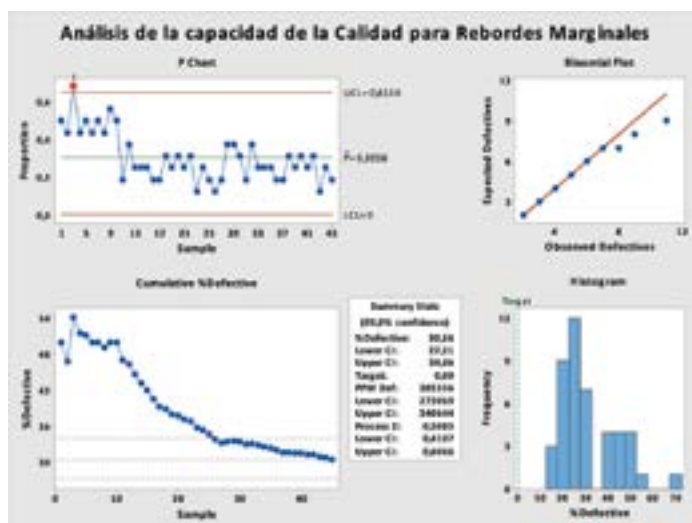


Figura 53. *Determinación de los niveles sigma para inclinación bucolingual*



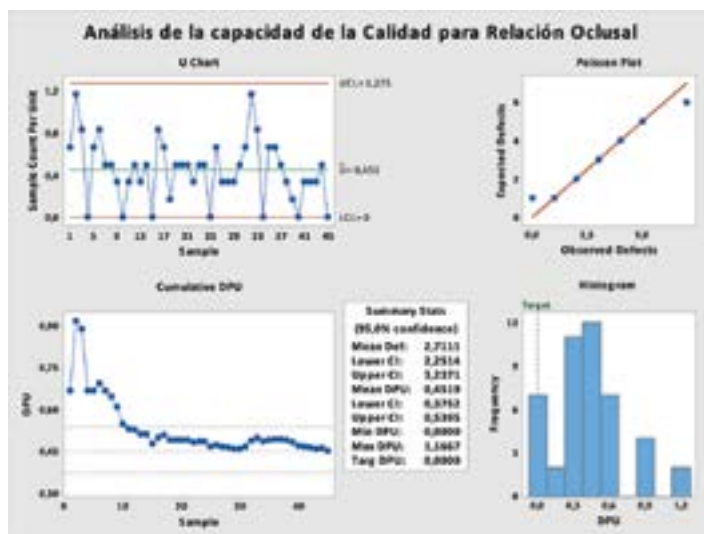
En la figura 54 se observa un nivel sigma de 1,25 sigmas para el proceso de contactos oclusales; igualmente existen varias observaciones situadas en el límite inferior de control, lo cual representa una advertencia de inestabilidad.

Figura 54. *Determinación de los niveles sigma para contactos oclusales*



La figura 55 presenta una media de Defectos por Unidad (DPU) de 0,45; lo cual equivale a 0,12 sigmas, y presenta varias observaciones en el límite inferior de control, que significa una advertencia de inestabilidad en la característica de Relación Oclusal

Figura 55. Determinación de los niveles sigma para relación oclusal



En la figura 56 se observa un nivel sigma de 1,09 y varias observaciones fuera de los límites de control, para el proceso de Overjet, lo cual significa que el proceso de la característica es inestable.

La figura 57 tiene un nivel sigma de 1,90 y observaciones fuera de los límites de control superior y otras en el límite de control inferior, para el proceso de la característica de Contactos Interproximales, lo cual representa un proceso inestable.

La figura 58 presenta un nivel sigma de 0,99 y varias observaciones en el límite inferior de control, lo cual representa inestabilidad en el proceso de la característica de Angulación de la Raíz. La tabla 6 presenta el resumen de los resultados de los niveles sigmas de las características observadas.

Figura 56. Determinación de los niveles sigma para Overjet

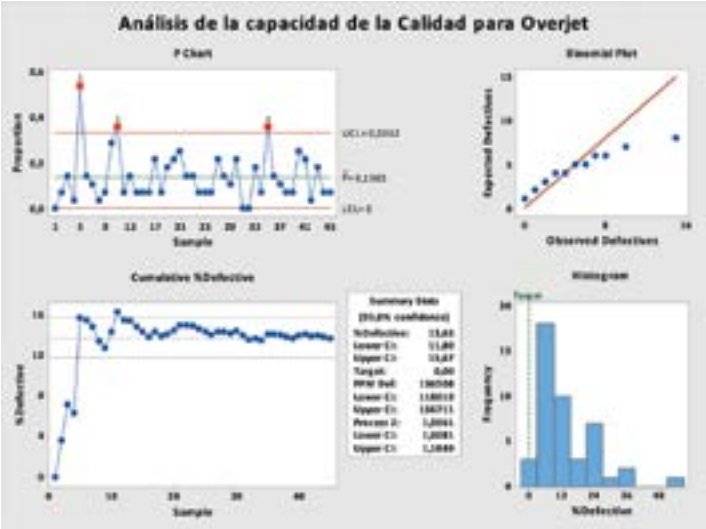


Figura 57. Determinación de los niveles sigma para contactos interproximales

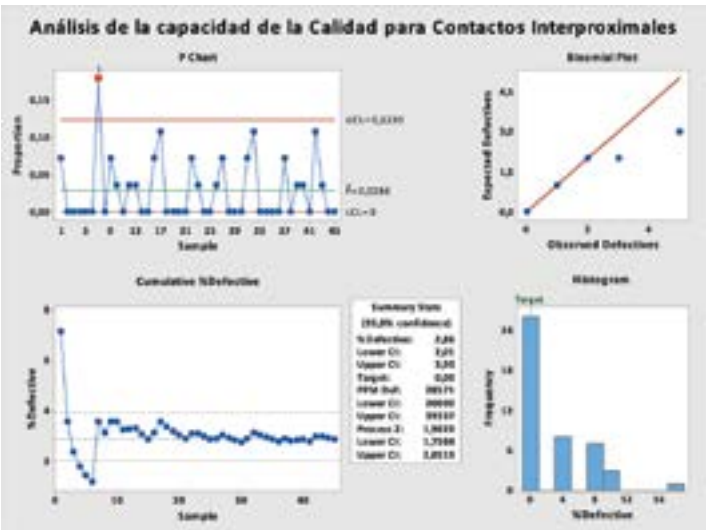
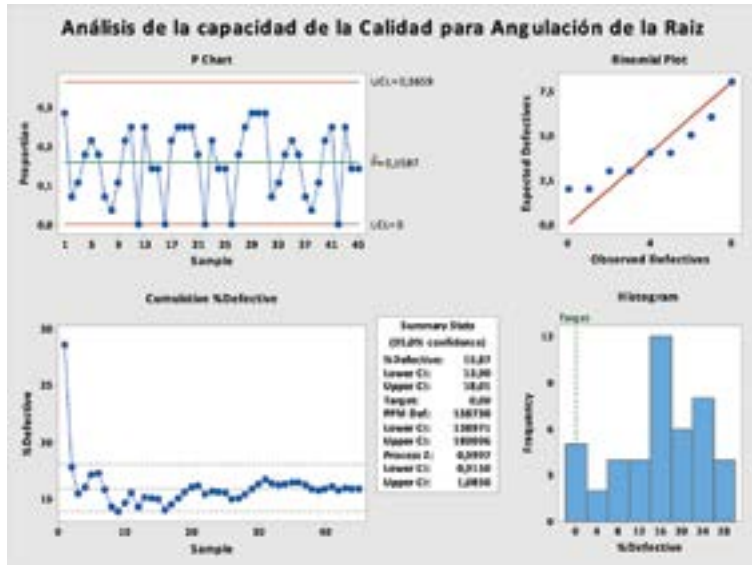


Figura 58. *Determinación de los niveles sigma para angulación de la raíz***Tabla 6.** *Resultados de los niveles sigma de las características del OGS*

Característica	Nivel Sigma	Categoría de la calidad
Alineación	1,13	Incompetente
Rebordes marginales	0,50	Incompetente
Inclinación bucolingual	0,63	Incompetente
Contactos oclusales	1,25	Incompetente
Relación oclusal	0,12 (0,45 Dpu-Dpo)	Incompetente
Overjet	1,09	Incompetente
Contactos interproximales	1,90	Incompetente
Angulación de la raíz	0,99	Incompetente

Fuente: Autores.

La tabla 6 muestra los niveles sigma y la categoría correspondiente de la calidad, después de realizar las mediciones correspondientes a cada característica según la OGS. Como se observa, el nivel sigma mayor fue 1,90 sigmas en contactos interproximales y el menor nivel sigma fue 0,50 para Rebordes marginales.

Por otra parte, los resultados de la medición del OGS en 45 pacientes (población total del año) es igual a 26,11 defectos en promedio (Ecuación 1), lo cual indica que cumplen con los criterios mínimos exigidos según Casco et al., 1998. Pero este resultado para los niveles sigma representa un nivel de 2,23 sigmas (Ecuación 2), lo cual es de incompetencia mundial (tabla 3).

$$Nivel\ OGS = \frac{1175\ defectos}{45\ pacientes} = 26,11 \frac{defectos}{paciente} \quad (1)$$

Por otra parte:

$$Dpo = \frac{26,11}{202\ oportunidades} = 0,129 Dpo \quad (2)$$

$$0,129\ Dpo = 2,23\ sigmas \quad (3)$$

En el OGS es aprobado el resultado de la calidad con 26,11 defectos por paciente; pero para niveles sigma este resultado es igual a 0,129 Dpo; es decir, 2,23 sigmas, lo cual es calidad de incompetencia mundial.

Discusión

El estudio encontró un promedio OGS de 26.11(DE 9.19) puntos en los 45 pacientes evaluados, y de los cuales el 33% no se consideraría el caso como aceptable, según las indicaciones ABO; estos resultados estarían dentro del promedio mostrado por la revisión de Papageorgiou et al. (2017) que en 34 estudios realizados en 6207 pacientes mostró un OGS de 27.9 (95% CI 25.3-30.6 puntos). Al comparar este resultado con los otros estudios similares realizados en Colombia encontramos que Barbosa-Lis et al. (2014), Universidad de Antioquia, en una muestra de 40 pacientes encontró un OGS de 31.7(+8.5) puntos y luego aplicaron un protocolo de finalización, mejorando los resultados obtenidos. En la Universidad de Manizales, Rodríguez et al. (2015) en una muestra de 31 pacientes encontraron un OGS de 30.94 (DE 11.03). A nivel internacional Campbell et al. (2007) en una muestra de 989 tratamientos terminados reportaron un OGS de 32.64 en la Universidad de Indiana;

Yang-Powers et al. (2002), Universidad de Illinois, reportaron un OGS de 33.88 en 32 casos examinados; Ying-Song et al. (2013), Universidad de Pekín, al relacionar el valor de OGS encontraron variabilidad subjetiva de acuerdo con el examinador y por ello consideran que tomar como aceptable hasta 30 defectos sería un error, ellos decidieron considerar como excelente un caso con menos de 16 defectos, aceptable entre 16 y 21 defectos y no aceptable un caso con más de 21 defectos, consideran el límite sugerido por ABO como muy amplio en cuanto a valoración de calidad; Cansunar y Uysal (2014), Universidad de Turquía, reportan un OGS de 18 defectos; Santiago y Martínez (2012), Universidad de Puerto Rico, reportaron un OGS de 32.17 (DE 13.03).

En cuanto a duración del tratamiento, la revisión de Papageorgiou et al. (2017) muestra que la duración de tratamiento promedio de la revisión fue de 24.9 meses (95% ci, 24.6- 25.1); en el presente estudio la duración promedio de los 45 casos fue mayor y es de 32.29 meses (DE 4.98). Esta variable de duración de tratamiento también es necesario seguirla con especial atención en centros universitarios como la Universidad Santo Tomás, donde esta puede verse afectada por los periodos vacacionales de los estudiantes y el cambio de residentes. Tsihlaki, Chin, Pandis y Fleming (2016) al hacer una revisión sistemática de la duración de tratamientos de ortodoncia en la última década que incluía 22 estudios y 1089 participantes encontraron una duración promedio de 19.9 meses; en su conclusión dan como recomendación que la duración del tratamiento de ortodoncia fuera menor a dos años.

No se encontraron estudios publicados que hayan medido la OGS por medio de los niveles sigma; por lo cual no tenemos comparación con esos estándares. Al realizar esta medición los mejores resultados se encontraron en contactos interproximales; lo que coincide con la mayoría de los estudios publicados y la deficiencia más reportada fue a nivel de los rebordes marginales e inclinación buco lingual.

Consideramos que el principal objetivo para que un centro de educación haga esta medición es que permite llegar a consensos sobre ela-

boración de guías para finalización de pacientes y estandarizar la evaluación final para el retiro de aparatología, este proceso ha iniciado en el Posgrado de Ortodoncia de la Universidad Santo Tomás y ha seguido con la metodología ABO en la línea de investigación, realizando trabajos de grado como los de Camargo, Niño, Olaya y Serrano (2020) y el de Correa y Rodríguez (2018). Actualmente está en fase de revisiones sistemáticas, para luego establecer unas guías de manejo para finalización de casos; consideramos la adopción de las prácticas de odontología basada en la evidencia como fundamentales para complementar los procesos de enseñanza-aprendizaje propios de centros universitarios.

Conclusiones

Los resultados de la medición, según el OGS, con respecto al proceso de ortodoncia, equivalen a 26,11 defectos/paciente, lo cual es aprobado por este estándar, más sin embargo, el resultado de los niveles sigma es igual a 2,23 sigmas, con respecto a las métricas de Lean Six Sigma, lo cual equivale a calidad de incompetencia mundial, que muestra una incongruencia en los resultados de las dos metodologías.

Desde las métricas de la metodología Lean Six Sigma, las mediciones realizadas con la metodología OGS sobre el proceso de ortodoncia representan calidad de incompetencia mundial, oponiéndose a la aprobación dada por la metodología del OGS.

Como estudios futuros es necesario encontrar las causas raíz del proceso de ortodoncia que ocasionan los niveles sigma bajos (calidad de incompetencia mundial) y proceder a eliminar dichas causas. Es necesario la adopción de guías de manejo propias construidas bajo la metodología de odontología basada en la evidencia.

Referencias

- Ahmed, S., Manaf, N.H., y R., I. (2013). Effects of Lean Six Sigma application in healthcare services: a literatura review. *Rev Environ Health*, 28(4), 189-194. doi: 110.1515/reveh-2013-0015.

- Allareddy, V., Shin, K., Marshall, S. D., y Southard, T. E. (2019). Characteristics of an excellent orthodontic residency program. *American journal of orthodontics and dentofacial orthopedics: official publication of the American Association of Orthodontists, its constituent societies, and the American Board of Orthodontics*, 156(4), 522-530. <https://doi.org/10.1016/j.ajodo.2018.10.026>
- Barbosa, D. M., Zapata, O., Carvajal, A., Franco, C., Rodríguez, S., Flores, A. y Restrepo, M. (2014). Resultado de tratamientos ortodóncicos y su relación con la complejidad de la mal oclusión. *International journal of odontostomatology*, 8(2), 201-206. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-381X2014000200008>
- Barrera, J. y Diana, M. (2015). Evaluación tratamientos terminados según parámetros ABO. *Ortodoncia W S.*, 4, 26-32.
- Campbell, C. L., Roberts, W. E., Hartsfield, J. K., Jr, y Qi, R. (2007). Treatment outcomes in a graduate orthodontic clinic for cases defined by the American Board of Orthodontics malocclusion categories. *American journal of orthodontics and dentofacial orthopedics: official publication of the American Association of Orthodontists, its constituent societies, and the American Board of Orthodontics*, 132(6), 822-829. <https://doi.org/10.1016/j.ajodo.2006.05.036>
- Camargo, D., Niño, A., Olaya, E. y Serrano, J. (2020). *Evaluación en la calidad de los tratamientos de ortodoncia finalizados por los estudiantes de la Especialización de Ortodoncia de la Universidad Santo Tomás según los parámetros ABO*. (tesis de posgrado). Universidad Santo Tomás.
- Cangialosi, T. J., Riolo, M. L., Owens, S. E., Jr, Dykhouse, V. J., Moffitt, A. H., Grubb, J. E., Greco, P. M., English, J. D., y James, R. D. (2004). The ABO discrepancy index: a measure of case complexity. *American journal of orthodontics and dentofacial orthopedics: official publication of the American Association of Orthodontists, its constituent societies, and the American Board of Orthodontics*, 125(3), 270-278. <https://doi.org/10.1016/j.ajodo.2004.01.005>
- Cansunar, H. A., y Uysal, T. (2014). Relationship between pretreatment case complexity and orthodontic clinical outcomes determined by the American Board of Orthodontics criteria. *The Angle orthodontist*, 84(6), 974-979. <https://doi.org/10.2319/010114-001.1>
- Carvajal, A., Barbosa, D.M. y Zapata, O.A. (2016). Orthodontic treatment outcomes obtained by application of a finishing protocol. *Dental Press J Orthod.*, 21(2), 8-94. doi:10.1590/2177-6709.1521.1592.1088-1094
- Casko, J.S., Vaden, J.L., Kokich, V.G., Damone, J., James, R.D. y Cangialosi, T.J. (1998). Objective grading system for dental casts and panoramic radiographs. American Board of Orthodontics. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.*, Nov(114), 589-599.

- Correa, J. y Rodríguez, O. (2018) Evaluación en la calidad de los tratamientos de ortodoncia finalizados por los estudiantes de la Especialización de Ortodoncia de la Universidad Santo Tomás (tesis de posgrado). Universidad Santo Tomás.
- Chung, C. H., Tadlock, L. P., Barone, N., Pangrazio-Kulbersh, V., Sabott, D. G., Foley, P. F., Trulove, T. S., Park, J. H., y Dugoni, S. A. (2017). Common errors observed at the American Board of Orthodontics clinical examination. *American journal of orthodontics and dentofacial orthopedics: official publication of the American Association of Orthodontists, its constituent societies, and the American Board of Orthodontics*, 152(2), 139-142. <https://doi.org/10.1016/j.ajodo.2017.05.012>
- Deblois, S., y L., L. (2016). Lean and Six Sigma in acute care: a systematic review of reviews. *Int J Health Care Qual Assur.*, 29(2), 192-208. doi:110.1108/IJHCQA-1105-2014-0058.
- O'Rourke, P. (2005). *A multiple-case analysis of lean six sigma deployment and implementation strategies*. (Tesis de maestría, Air Force Institute of Technology). <https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a437541.pdf>
- Owens, S. E., Jr, Dykhouse, V. J., Moffitt, A. H., Grubb, J. E., Greco, P. M., English, J. D., Briss, B. S., Jamieson, S. A., y Riolo, M. L. (2006). The case management form of the American Board of Orthodontics. *American journal of orthodontics and dentofacial orthopedics: official publication of the American Association of Orthodontists, its constituent societies, and the American Board of Orthodontics*, 129(3), 325-329. <https://doi.org/10.1016/j.ajodo.2005.11.004>
- Papageorgiou, S.N., Höchli, D. y T., E. (2017). Outcomes of comprehensive fixed appliance orthodontic treatment: A systematic review with meta-analysis and methodological overview. *Korean J Orthod.*, 47(6), 401-413. doi:410.4041/kjod.2017.4047.4046.4401
- Porter, M., y Teisberg, E. (2004). Redefining competition in health care. *Harv Bus Rev.*, 82(6), 64-76.
- Santiago, J. J., y Martínez, C. J. (2012). Use of the Objective Grading System of the American Board of Orthodontics to evaluate treatment at the Orthodontic Graduate Program Clinic, University of Puerto Rico, 2007-2008. *Puerto Rico health sciences journal*, 31(1), 29-34.
- Song, G. Y., Baumrind, S., Zhao, Z. H., Ding, Y., Bai, Y. X., Wang, L., He, H., Shen, G., Li, W. R., Wu, W. Z., Ren, C., Weng, X. R., Geng, Z., y Xu, T. M. (2013). Validation of the American Board of Orthodontics Objective Grading System for assessing the treatment outcomes of Chinese patients.

American journal of orthodontics and dentofacial orthopedics: official publication of the American Association of Orthodontists, its constituent societies, and the American Board of Orthodontics, 144(3), 391-397. <https://doi.org/10.1016/j.ajodo.2013.04.018>

- Tsichlaki, A., Chin, S. Y., Pandis, N., y Fleming, P. S. (2016). How long does treatment with fixed orthodontic appliances last? A systematic review. *American journal of orthodontics and dentofacial orthopedics: official publication of the American Association of Orthodontists, its constituent societies, and the American Board of Orthodontics*, 149(3), 308-318. <https://doi.org/10.1016/j.ajodo.2015.09.020>
- Van Leijen-Zeelenberg, J.E., Elissen, A.M.J., Grube, K., Van Raak, A.J.A., Vrijhoef, H.J.M., Kremer, B. y D., R. (2016). The impact of redesigning care processes on quality of care: a systematic review. *BMC Health Serv Res.*, 19(19), 16-19. doi: 10.1186/s12913-12016-11266-12910.
- Verma, R., Utreja, A. K., Singh, S. P., y Jena, A. K. (2015). Implementation of post treatment critical evaluation improved the quality of orthodontic care in postgraduate orthodontic clinic: A 10 years comparative study. *Indian journal of dentistry*, 6(3), 125-129. <https://doi.org/10.4103/0975-962X.163035>
- Yang-Powers, L. C., Sadowsky, C., Rosenstein, S., y BeGole, E. A. (2002). Treatment outcome in a graduate orthodontic clinic using the American Board of Orthodontics grading system. *American journal of orthodontics and dentofacial orthopedics: official publication of the American Association of Orthodontists, its constituent societies, and the American Board of Orthodontics*, 122(5), 451-455. <https://doi.org/10.1067/mod.2002.128464>

Modelo de regresión de respuesta cualitativa, costos de transacción en la comercialización de la mora

Pascual Rueda Forero

Facultad de Ingeniería Industrial, grupo de Investigación en Calidad y Productividad - CAYPRO, Universidad Santo Tomás, Bucaramanga, Colombia, Correo electrónico: pascual.rueda@ustabuca.edu.co

José Joaquín Álzate Marín

Facultad de Contaduría Pública, grupo de Investigación para el Desarrollo Contable - LINDERCON, Universidad Santo Tomás, Bucaramanga, Colombia, Correo electrónico: jose.alzate@ustabuca.edu.co

Introducción

Modelos de regresión de respuesta cualitativa

Naturaleza del modelo de regresión de respuesta cualitativa

La naturaleza de este tipo de modelos radica en la decisión que ocurra un evento contra la decisión de que no ocurra, por lo tanto, la variable respuesta, solo puede adquirir dos valores; por ejemplo, la decisión de que ocurra un evento 1 si una empresa se quiebra y 0 si no lo hace. En otras palabras, la variable respuesta es una variable dicótoma o de tipo binario. En este sentido, en todo el mundo se han hecho infinidad de trabajos de investigación en todas las áreas económicas, la economía ambiental usa estos modelos para identificar la probabilidad a pagar en el uso de un recurso natural. Igualmente, en muchos países empezando por Estados

Unidos se mide la probabilidad de voto de un candidato dependiendo de la afiliación política que este tenga, para estos casos si pertenece al partido republicano o al partido demócrata, en estos casos se escoge $Y=0$ si es republicano o $Y=1$ si es del partido demócrata.

Sin embargo, no tenemos que restringir la variable respuesta a un sí o un no, pues pueden existir regresadas tricótomas o de categoría múltiple, para el ejemplo de la probabilidad de votar puede aparecer otro partido, por ejemplo, los independientes. Es importante de todos modos hacer hincapié en la diferencia entre un modelo de variable dependiente cuantitativa y un modelo de variable dependiente cualitativa.

En un modelo donde la variable dependiente es cuantitativa, el objetivo consiste en estimar el valor esperado, dados los valores de una o más variables regresoras; es decir, obtener la $E(Y_i | X_{1i}, X_{2i}, \dots, X_{ki})$, donde las X son las regresoras, tanto cualitativas como cuantitativas). El objetivo es encontrar la probabilidad de que un acontecimiento suceda, como que se quiebre una empresa, la disponibilidad a pagar por el uso de un servicio ambiental, asistir a un evento científico, etc. Por tanto, los modelos así llamados de respuesta cualitativa a menudo se conocen como modelos de probabilidad.

Preguntas orientadoras.

1. ¿Cómo estimar los modelos de regresión con respuestas cualitativas?
2. ¿Se estiman este tipo de modelos con los supuestos usuales de MCO?
3. ¿Se presentan problemas al realizar las pruebas de hipótesis tradicionales?
4. ¿Cómo se estima la prueba de bondad de ajuste en este tipo de modelos, dado que la variable respuesta es cualitativa?
5. ¿Qué supuestos usualmente no se cumplen cuando se estiman este tipo de modelos?

En este capítulo se responderán algunas de las preguntas a un nivel básico, pues algunos temas requieren de un conocimiento matemático y

estadístico mayor que el supuesto en la construcción de este libro. Hay cuatro métodos para crear un modelo de probabilidad para una variable de respuesta binaria:

El modelo lineal de probabilidad (MLP); el modelo Logit; el modelo Probit y el modelo Tobit.

En vista de su simplicidad relativa y debido a que su estimación es por el método de mínimos cuadrados ordinarios (MCO), estudiaremos en primera instancia el modelo lineal de probabilidad (MLP).

Modelo lineal de probabilidad (MLP)

Para empezar, considere el siguiente modelo de regresión simple:

$$Y_i = b_1 + b_2 X_i + u_i \quad (1)$$

Donde X_i = el nivel de endeudamiento, y $Y_i = 1$ si la empresa se declara en insolvencia y 0 si no se declara en insolvencia. El modelo (1) parece a simple vista un modelo de regresión lineal común, pero debido a que la variable regresada es binaria, se denomina modelo lineal de probabilidad (MLP). Esto es porque la esperanza de Y_i dado X_i , $E(Y_i \mid X_i)$ puede interpretarse como la probabilidad condicional de que el suceso tenga lugar dado X_i ; es decir, $\Pr(Y_i = 1 \mid X_i)$. Así, en el ejemplo, $E(Y_i \mid X_i)$ da la probabilidad de que una empresa se quiebre y tenga un nivel de endeudamiento X_i .

La justificación del nombre MLP para modelos como (1) es la siguiente: en el supuesto de que $E(u_i) = 0$, como es usual (para obtener estimadores insesgados), obtenemos

$$E(Y_i \mid X_i) = b_1 + b_2 X_i \quad (2)$$

Ahora si P_i = probabilidad de que $Y_i = 1$ (es decir que el suceso ocurra) y $(1 - P_i)$ = probabilidad de que $Y_i = 0$ (es decir, que el suceso no ocurra), la variable Y_i tiene la siguiente distribución de probabilidad:

$$E(Y_i) = 0(1 - P_i) + 1(P_i) = P_i \quad (3)$$

Al comparar (2) con (3), igualamos

$$E(Y_i \setminus X_i) = b_1 + b_2 X_i = P_i \quad (4)$$

Es decir, la esperanza condicional del modelo (1) en realidad se interpreta como la probabilidad condicional de Y_i . De manera general la esperanza de una variable aleatoria Bernoulli está dada por la probabilidad p de éxito y una probabilidad $(1-p)$ de fracaso, y X de tales intentos representará el número de éxitos, se dice que X sigue una distribución binomial. La media de la distribución binomial es np , y su varianza, $np(1-p)$.

Como la probabilidad P_i debe encontrarse entre 0 y 1, tenemos la siguiente restricción

$$0 \leq E(Y_i \setminus X_i) \leq 1 \quad (5)$$

Es decir, la esperanza condicional de (o probabilidad condicional) debe encontrarse entre 0 y 1

Del análisis anterior pareciera que no existen dificultades para que los MCO puedan ser usados en modelos de variable regresada binaria, pero no es el caso, pues el modelo lineal de probabilidad plantea diversos problemas, a saber:

Varianzas heteroscedásticas de las perturbaciones.

Aunque $E(u_i) = 0$ y la $cov(u_i, u_j) = 0$ para todo $i \neq j$ (es decir, no existe correlación serial), el hecho de que las observaciones sean cortes transversales no es posible cumplir el supuesto de homoscedasticidad en las perturbaciones. Pero esto no debe sorprender. Como lo demuestra la teoría estadística, para una distribución de Bernoulli, la media y la varianza teóricas son p y $p(1-p)$, respectivamente, donde p es la probabilidad de

éxito (es decir que ocurra el evento), lo cual revela que la varianza es una función de la media. Por lo tanto, la varianza del error es heteroscedástica

$$Var(ui) = Pi(1 - Pi) \quad (6)$$

Es decir, la varianza del término error en el MLP es heteroscedástica. Como $Pi = E(Yi \setminus Xi) = b1 + b2Xi$, la varianza de Ui depende, al final, de los valores de X y por lo tanto no es homoscedástica. Ya sabemos que, en presencia de heteroscedasticidad, los estimadores de MCO, aunque insesgados, no son eficientes, es decir no tienen varianza mínima. Existen diversos métodos para superar el problema de heteroscedasticidad. Como la varianza de Ui depende de $E(Yi \setminus Xi)$, una forma de resolver el problema es ponderar el modelo (1.2.1) dividiendo en ambos lados del modelo por el ponderador

$$raiz(pi(1 - pi)) \quad (7)$$

Al transformar el modelo dividiendo por el ponderador escogido que lo podemos llamar raíz de Wi . En teoría es correcto lo que se acaba de hacer, pero se desconoce la verdadera $E(Yi \setminus Xi)$, y en consecuencia se desconocen las ponderaciones Wi . Para su cálculo se recurre a los siguientes pasos (Goldberger, 1964): Paso 1. Estime la regresión (1.2.1) por MCO y obtenga los Y estimados; con los Y estimados construya raíz (Wi estimado) = raíz (Y estimado*(1- Y estimado)), y estime una regresión ponderada por la raíz de Wi estimado. Paso 2. Con Wi estimado transforme los datos dividiendo cada término de la ecuación (1) por el ponderador, ahora Wi estimado y estime por MCO (es decir, Mínimos cuadrados ponderados).

No cumplimiento de $0 \leq E(Yi \setminus Xi) \leq 1$

Como $E(Yi \setminus Xi)$ mide la probabilidad condicional de que ocurra el suceso Y dado X , esta debe encontrarse necesariamente entre 0 y 1. Aunque a priori esto es verdadero, no existe garantía de que los Yi estimados, los estimadores de $E(Yi \setminus Xi)$ cumplan necesariamente esta restricción, generándose el verdadero problema con la estimación del

MLP por MCO. Esta situación se presenta porque MCO no toma en cuenta la restricción $0 \leq E(Y_i | X_i) \leq 1$ (una restricción de desigualdad). Hay dos formas de establecer que los Y estimados se encuentran entre 0 y 1. Una es estimar el modelo mediante MCO y hallar los Y estimados, y verificar si existen probabilidades negativas, menores a cero o si existen probabilidades positivas mayores a 1. Sabemos que una probabilidad solo existe en el rango 0 – 1 y una forma de solucionar el problema es acercar el negativo a 0 y de convertir las probabilidades mayores a 1 en 1. Los modelos Logit y Probit que analizamos más adelante garantizan que las probabilidades estimadas se encuentren entre el rango 0 y 1.

Valor cuestionable de R^2 como medida de bondad de ajuste.

R^2 calculado de manera convencional tiene un valor limitado en los modelos de variable respuesta dicótoma. La razón nace en la definición del coeficiente de determinación que busca explicar el grado en que la regresión que usa variables, tanto cuantitativas como dicótomas explica una variable regresada que está entre 0 y 1, por lo que no existe relación que ajuste bien la dispersión de las variables regresoras. Como resultado, es probable que el cálculo convencional de R^2 sea muy inferior a 1 en este tipo de modelos; por eso John Aldrich y Forrest Nelson (1981) sostienen que el R^2 tradicional debe evitarse como medida de bondad de ajuste en modelos de variable dependiente cualitativa (Amemiya, 1981).

Una manera práctica para encontrar el pseudo R^2 , es encontrar cuantas observaciones son correctas en la estimación:

Partiendo del concepto del error como la diferencia entre Y - Y estimado y ya solucionado el problema de observaciones estimadas mayores a 1 y menores a cero; es decir, ajustando a cero las negativas y a 1 las mayores de uno encontramos lo que es correcto y lo que es incorrecto. Es correcto que observe que se presenta el evento, entonces 1 y el modelo estima una probabilidad cercana a 1. También es correcto que no se presente el evento y el modelo estime que su probabilidad es cercana a 0. Sería incorrecto que observe que no se presenta el evento y el modelo estime

que si se presenta el evento (concluye probabilidades >0.5), también sería incorrecto que observe que se presenta el evento y el modelo estime que no.

Tabla 7. *Resumen para hallar porcentaje de correctos*

Y Observado	Y Estimado
1	1 Correcto
0	0 Correcto
0	1 Incorrecto
1	0 Incorrecto

Fuente: Autores del capítulo.

Al hacer la comparación se obtiene el número de observaciones correctas y estas se dividen por el total de observaciones, obteniendo de esta manera el porcentaje de correctos que estima el modelo. El R^2 en este tipo de modelos será elevada, por ejemplo, superior a 0.8, solo cuando la dispersión observada esté muy concentrada alrededor de 0 y 1. En este caso si dividiendo el número de observaciones correctas sobre el total de observaciones de la muestra, da como resultado 0.65 o mayor, se puede considerar que el modelo explica correctamente el 65% o más de las observaciones en estudio y la experiencia es un buen indicador de bondad de ajuste en este tipo de modelos.

No normalidad en las perturbaciones U_i

Aunque MCO no requiere que las perturbaciones estén normalmente distribuidas, es de suponer que lo estaban para fines de inferencia estadística. Pero el supuesto de normalidad para los U_i ya no se mantiene en los MLP porque al igual que Y_i , U_i solo toma dos valores; entonces sigue la distribución de Bernoulli. Para observarlo con ecuaciones, podemos escribir 1.2.1 como:

$$u_i = Y_i - b_1 - b_2 X_i \quad (8)$$

La distribución de probabilidad de U_i es

Ui Probabilidad

$$\text{Cuando } Y_i = 1 \quad 1 - b_1 - b_2 X_i \quad P_i \quad (9)$$

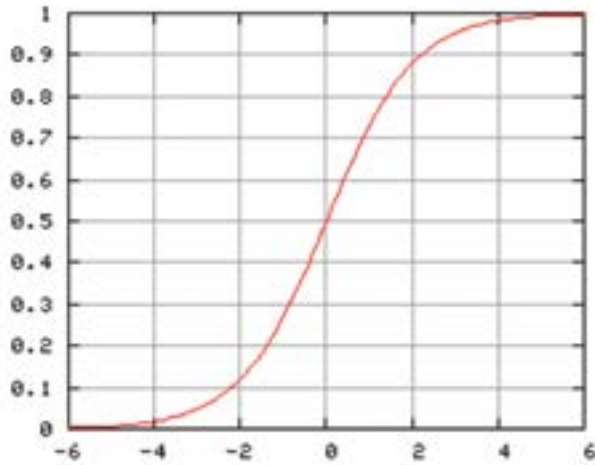
$$\text{Cuando } Y_i = 0 \quad -b_1 - b_2 X_i \quad (1 - P_i)$$

Pero el no cumplimiento del supuesto de normalidad no es tan crítico como puede parecer, porque es de saber que las estimaciones puntuales de MCO aún permanecen insesgadas, concluyendo que el cumplimiento de este supuesto resulta innecesario y basta que se aumente el tamaño de la muestra para conseguir la distribución normal de los estimadores.

Modelo Logit

Como vimos el MLP tiene algunos problemas, como: 1. la no normalidad en los U_i , 2. la heteroscedasticidad de los U_i , 3. la posibilidad que los Y estimados se encuentre fuera del rango 0-1, y 4. el valor del R^2 cuestionado como medida de bondad de ajuste, generalmente arroja valores muy bajos cuando se estima por MCO. Pero estos problemas son superables con las técnicas expuestas anteriormente. Pero incluso así, el problema fundamental con el MLP es que no es un modelo muy atractivo porque supone que $P_i = E(Y=1 \mid X)$ aumenta linealmente con X , es decir, el efecto marginal de X permanece constante todo el tiempo. Así en el ejemplo de que por un incremento de 1% en el nivel de deuda la probabilidad que una empresa se quiebre aumenta en la misma cantidad constante de 0.10, esto es así independiente si se incrementa en mayor porcentaje la deuda.

Por consiguiente, se necesita un modelo probabilístico que tenga dos características: 1. A medida que aumente X_i , $P_i = E(Y=1 \mid X)$ también aumente, pero nunca se salga del intervalo 0-1, y 2. La relación entre P_i y X_i sea no lineal, es decir, “uno se acerca a cero con tasas cada vez más lentas a medida que se reduce X_i , y se acerca a uno con tasas cada vez más lentas a medida que X_i se hace muy grande”.

Figura 59. *La función logística*

Fuente: [es.wikipedia.org/wiki/funci3n Logística](https://es.wikipedia.org/wiki/funci3n_Logística).

En términos geométricos, el modelo que deseamos tendría la forma de la figura 59. El lector podrá observar en este modelo que la probabilidad se encuentra entre 0 y 1, y que este varía en forma no lineal con X.

El lector se dará cuenta de que la curva en forma de S, o sigmoidea, en la figura se parece bastante a la función de distribución acumulativa de una variable aleatoria (FDA). Igualmente, la FDA que suelen seleccionarse para representar los modelos de respuesta dicótoma 0-1 son 1. a distribución logística, y 2. la distribución normal; la primera da lugar al modelo Logit y la segunda al modelo Probit.

$$Li = LN(Pi/(1 - Pi)) = b1 + b2Xi + ui \quad (10)$$

Desarrollo del capítulo

Con base en los objetivos específicos, se realiza el análisis de varios enfoques de la economía neoinstitucionalista (Fuentes, 2017), permite observar factores, recursos y líneas de acción que se deben seguir para comercializar

de manera eficiente el producto y lograr competitividad y sustentabilidad en el mercado, pero Ronald Coase, citado por Shastitko, y Ménard (2017), expresa que los costos de transacción van mucho más allá que la teoría neoclásica, porque concibe a la organización empresarial como una función de producción que convierte factores productivos en productos terminados y su propósito es maximizar sus rendimientos económicos.

Ronald Coase se dio a la tarea de analizar, de primera mano, cómo funcionaban las empresas y cuáles eran sus problemas, y como resultado de este análisis, expresa que las firmas sustituían al mercado en su función de coordinador económico, cuando amparadas bajo la figura de empresas eliminaban los costos de transacción por medio de los contratos entre el empleador y sus trabajadores, puesto que estos últimos cedían sus derechos de propiedad sobre su producción manual-física o intelectual (Coase, 1994). Es decir, las empresas son una forma de organización cooperativa que reduce de manera significativa los costos de transacción.

Los costos de transacción son diferentes a los costos de producción, estos últimos costos se relacionan directamente con la transformación física del producto o la prestación del servicio, mientras que los costos de transacción, según Ramírez (2010), no son más que los costos que se derivan de las transacciones, y para el caso particular en la comercialización de la mora en Santander son los costos de mantener circulando los factores productivos requeridos para el desarrollo de los procesos, o la prestación de servicios, teniendo como escenario los mercados o la misma empresa.

Williamson (2002) expresa que uno de los mayores inconvenientes que afrontan las empresas hoy día son los cambios recurrentes del mercado, y su jerarquía, lo cual hace que las empresas tengan que adaptarse a él si quieren ser competitivos y sobrevivir, para ello, es necesario minimizar los costos de transacción, recurriendo a estrategias empresariales y de mercado.

Entre tanto, Coase hace un señalamiento de la existencia del dilema “to make Vs to buy”; es decir, a veces es necesario que la empresa se especialice en actividades internas al proceso productivo, mientras en otras

circunstancias es mejor actividades inherentes al mercadeo. Este dilema trae como consecuencia un nuevo concepto de empresa, ya que la empresa será percibida como un conjunto de transacciones que son organizadas, interna como externamente para lograr ser competitivas (Coase, 1937).

El objetivo de las transacciones según (Menéndez, 2005) es maximizar los beneficios y la satisfacción de los sujetos involucrados en estas, por lo tanto, la importancia que asume una transacción para un individuo dependerá en gran medida de lo que este gane o pierda en relación con cuánto esperaba ganar o perder con dicha transacción, es por eso, que estos costos suelen equipararse con los costos de oportunidad.

Los riesgos y la incertidumbre siempre están presentes en los procesos de transacciones, por lo que los contratos surgen como salvaguarda para intentar controlar los problemas que se puedan presentar como resultado de una negociación incompleta, gracias a las fallas en la información, puesto que la razón de ser del mercado son las transacciones y estas siempre estarán acompañadas de unos costos asociados, que están presentes en todas las actividades de una empresa, tanto primarias como de apoyo a lo largo de toda la cadena de valor, el estudio de estos costos se hace fundamental si se quiere alcanzar el éxito empresarial (Idárraga, 2012).

La evidencia llevada a cabo en este estudio es empírica, la cual permite inferir el tamaño de la empresa, la inversión en activos físicos y su capacidad de generar relaciones estables con los compradores, logrando interrelacionar los agentes económicos en los diferentes eslabones de la cadena de comercialización de forma estable; se entrevista a más de 300 productores elegidos aleatoriamente según muestreo estratificado.

Luego, se utilizó un análisis bivariado con tablas de contingencias en las que “se relaciona la forma contractual elegida con las variables que caracterizan al productor o que constituyen en muchos casos costos de transacción”. El resultado fue una aproximación econométrica que mostró la relación entre las decisiones y los resultados con un conjunto de factores derivados de las transacciones.

Ahora bien, con base en las teorías expuestas se identifican algunos costos de transacción y se definen algunos conceptos de los costos de coordinación Vs costos de transacción (Henríquez-Fuentes et al., Simancas, 2018).

Son costos de transacción aquellos costos en los que incurre el sector agrícola cuando tiene actividades de transformación y transferencia de productos o servicios dentro de un mercado recurrente, en el que los agricultores deben invertir para efectivamente llevar a cabo cualquier clase de intercambios. De esta forma, se identifican cuatro clases de costos: los costos de colaboración y relación, los de búsqueda, los costos de negociación y los costos de seguimiento y control (Williamson, 1991).

Los costos de colaboración y relación ayudan a establecer las relaciones de intercambio entre consumidores, empleados, operarios, proveedores, socios y competidores; los costos de búsqueda están relacionados con los vacíos que tienen los agricultores al buscar información relevante para poder realizar un intercambio. Los compradores hacen esfuerzos para encontrar bienes que respondan a sus necesidades. De igual forma, quien desea vender debe identificar los perfiles de sus clientes potenciales para diseñar estrategias de publicidad y comercialización.

Los costos de negociación tienen relación con la conformación contractual o acuerdos entre las partes, no basta localizar una posibilidad de intercambio si no se puede generar un arreglo mutuamente beneficioso a través de un contrato, a pesar de que siempre existe la posibilidad de ejercer alguna clase de poder para hacer arreglos forzados, incluso esta posibilidad implica costos, que en la mayoría de los casos no son despreciables.

La negociación depende de la capacidad que tengan los agricultores para realizar contratos claros y creíbles que definan las condiciones en las cuales se va a llevar a cabo la transacción. Además, es fundamental prever todas las posibilidades futuras de conflicto cuando el intercambio implica acuerdos en diferentes momentos.

Los costos de seguimiento y control vigilan la actividad comercial para que se cumplan las condiciones pactadas, y se mantengan los derechos de propiedad sin ser vulnerados, es decir, acuerdos claros a través del tiempo para disminuir las conductas oportunistas (Coase, 1994). Al mismo tiempo se afirma: que los costos de transacción ocurren cuando se transfiere un bien o servicio a través de una interfase y termina cuando se inicia la otra (Williamson, 1996).

Por otra parte, se definen los costos de coordinación, que tienen diferentes clasificaciones de acuerdo con el enfoque y la utilización que se les dé, como por ejemplo, de acuerdo con la función en la que se incurren pueden ser costos de producción, costos de distribución y venta, costos de administración, costos financieros.

Si se analiza con base en una actividad, departamento o producto, puede clasificarse en costos directos e indirectos; si se analiza con base en el tiempo, pueden ser costos históricos o predeterminados; igualmente, si se analiza con base en costos de acuerdo con su comportamiento, pueden ser fijos, variables y mixtos.

Al caracterizar los C.T en la comercialización de la mora se hicieron búsquedas de información en diferentes áreas donde se produce la mora, encontrándose la zona de Sevilla, ubicada en Piedecuesta, Santander; se analiza el perfil productivo de Piedecuesta sobre la mora, se hacen varias visitas a la zona de influencia y se contacta a productores de mora o parcelas en menor y mayor escala, es decir, productores con menos de 10 hectáreas y productores con más de 10 hectáreas, líderes comunitarios, con el objetivo de obtener información primaria para el desarrollo del proyecto, igualmente, se llevaron a cabo reuniones con dueños de los cultivos y con comercializadores del fruto en la zona de centro abastos, plazas de mercado y en las respectivas fincas.

El departamento de Santander cuenta con 87 municipios, y Piedecuesta limita por el norte con Tona, Floridablanca y Bucaramanga, al oriente con Santa Bárbara, al sur con Guaca, Cepita, Aratoca y los San-

tos, y al occidente con Girón. Piedecuesta está ubicada en la provincia de Soto y hace parte del área metropolitana de Bucaramanga, situándose a 17 km de esta, y a 378 km de Bogotá (PBOT, 2003), cuenta con 2043 hectáreas de tierras dedicadas al cultivo de productos agrícolas, como mora, café y hortalizas (cilantro, apio, tomate, habichuela principalmente), es el segundo productor de mora nacional contando con más de 1779 productores tecnificados y 1009 más que realizan el proceso de forma artesanal.

Los cultivadores de mora en la región tienen las siguientes modalidades de transacciones: mercados, integración vertical (Taborda y Fernández, 2017), integración vertical total (Tapia, 2019). Cabe destacar que la estrategia que tiene mayor impulso es la integración vertical parcial, debido a que el productor asume la merma y el flete al momento de realizar la negociación en los puntos de venta y, en algunos casos, el productor es dueño de su propio vehículo de transporte.

Para proponer una metodología en la medición de los CT es necesario que los mareros de la zona de estudio obtengan información adecuada sobre las diferentes falencias e incertidumbres que presentan los mercados recurrentes al momento de comercializar el producto. Es decir, qué motivación tienen los agricultores al integrarse verticalmente, a vincularse contractualmente o vender sin la incorporación de ningún valor agregado.

Cada uno adopta una estructura que resulte más beneficiosa en su relación comercial, más aún, las condiciones en las cuales se toman decisiones no son homogéneas, muchos de los productores no tienen el mismo acceso a la información sobre precios y alternativas de comercialización, algunos cuentan con un *Know How*, una trayectoria, experiencia de algún vecino, también, existen diferencias entre la capacidad de gerenciamiento, debido al nivel de educación que limita la actividad comercial, el mercado exige un buen conocimiento de marketing y comercialización.

La teoría tradicional de la firma expresa que los agentes económicos que participan en el intercambio tengan información perfecta, donde se destaca la existencia de incertidumbre y costos asociados, en este contexto

las transacciones tienen lugar en un ambiente sin interferencia, y como resultado se presenta una situación eficiente.

Los C.T a diferencia de la teoría económica neoclásica reconocen que la actividad comercial no transcurre en un ambiente sin fricciones. Realizar intercambios trae unido costos de transacción, porque toma importancia la asignación de recursos y las formas de organización económica, Williamson, afirma que los C.T adoptan una aproximación contractual y una conducta racional limitada y oportunista. Al mismo tiempo, existe una internalización y externalización de actividades, dándose como resultado un esquema de contratación simple, debido a las relaciones idiosincrásicas entre empresas, clientes, proveedores, distribuidores o minoristas donde en estas relaciones especiales implican, por su propia naturaleza, una relación de pequeños números o un mercado de pocos competidores.

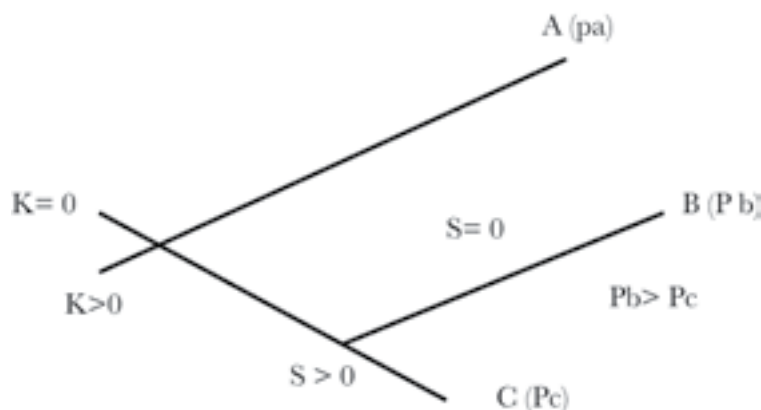
La contratación simple tiene la siguiente estructura: k es igual a una medida de los activos específicos; $k = 0$ para aquellas transacciones que involucran el uso de tecnologías de carácter general; $k > 0$ usan tecnologías específicas, en las que las partes perderían valor si las transacciones terminaran prematuramente; S es igual a la magnitud de las salvaguardas para proteger las transacciones con activos específicos; $S > 0$ para aquellas transacciones donde se proveen salvaguardas.

Los resultados posibles pueden verse en la figura 60, asociándose un precio diferente a cada uno.

Para comparar las formas de contratación alternativas, Williamson expresa que las partes: i. son neutrales al riesgo, ii. pueden proveer bajo cualquier tecnología, iii. aceptan cualquier condición de salvaguarda mientras los resultados esperados sean equivalentes. El precio de C (P_c), es menor que el precio B (P_b), porque el comprador ofrece una salvaguarda al vendedor. Puede decirse que A, B y C tienen las siguientes propiedades: i. Las transacciones que no usan activos específicos ($k = 0$) se ubican en el nodo A y no necesitan estructuras de gobernación pro-

tectoras. Predomina la competencia. ii. Las transacciones que involucran el uso de activos altamente específicos ($k > 0$) generan una situación de monopolio bilateral entre las partes. iii. Las transacciones ubicadas en el nodo B no tienen salvaguardas y tienden a ser contractualmente inestables. Pueden revertirse y ubicarse en el punto A donde la tecnología especializada es reemplazada por otra de tipo general o en el punto C introduciendo salvaguardas contractuales que incentiven el uso de las tecnologías específicas. iv. Las transacciones ubicadas en C incluyen salvaguardas que las protegen de los peligros de la expropiación.

Figura 60. Esquema de contratación simple



Fuente: Williamson, 1991.

Para intentar contrastar empíricamente las cuestiones planteadas anteriormente, se procede a realizar un cuestionario donde se incluyen preguntas con base en el marco teórico de C.T en la comercialización de la mora en la zona de estudio. Igualmente, se tomarán en cuenta las entrevistas a profundidad, elegidos aleatoriamente. La información se obtuvo por encuestas realizadas en la plaza de mercado, centro abastos y en diferentes zonas productoras.

Se tomó una población de 2788 productores, un margen de error del 8% para un total de encuestas de 134.

La tabla 8 describe las variables incluidas en la comercialización de la mora dentro y fuera del área metropolitana de Bucaramanga, también, se diferencian varias modalidades de relaciones contractuales: ventas de contado realizadas en centro abastos, plazas de mercado, intermediarios locales, supermercados y ventas a crédito o ventas complejas. Estas variables fueron tomadas como variables dependientes, con el fin de saber cuál es el modo de comercialización de la mora elegida.

De igual forma, se intenta recoger información pertinente sobre costos de colaboración y relación de búsqueda, de negociación, seguimiento y control, como son: conocimiento del mercado, mermas, fletes, otras actividades, asesoría jurídica, experiencia en años, cantidad de hectáreas cultivadas, asociación, tipo de rendimiento, satisfacción, mala experiencia y educación.

Resultados

Los resultados se obtuvieron mediante aplicación y análisis de tablas de contingencia, la cual se relaciona la forma contractual elegida que caracteriza al productor/comercializador de mora y que constituye costos de transacción, también permiten realizar inferencias acerca de la independencia de pares de variables. Los estadísticos se diseñan suponiendo como hipótesis nula la ausencia de relación entre variables. Si por el contrario rechaza la hipótesis nula se muestra la relación que existe entre las variables.

Para el desarrollo del proyecto se utiliza el estadístico Chi-Cuadrado de Pearson, se construye a partir de las diferencias entre las frecuencias observadas y las esperadas, bajo la hipótesis de independencia y la razón de verosimilitud. Para el cálculo se utilizó el paquete estadístico SPSS. Asimismo, se realizó un estudio econométrico, se tuvieron en cuenta dos alternativas: vender a contado o crédito, y se tomó como variable dependiente; se observó que el fenómeno por modelizar no es continuo, por lo tanto, no es posible hacer estimaciones a partir del modelo clásico de regresión lineal, resultando conveniente utilizar uno de respuesta cualitativa.

Tabla 8. *Variables incluidas en la comercialización de la mora*

Variable	Descripción	Respuesta posible	Signo esperado
Variable dependiente			
¿Cómo?	Cuál es el modo de comercialización de la mora elegida.	Venta contado (1) Venta crédito (0)	
Variables independientes			
Costo de transacción			
Frecuencia: relación comercial	¿Cuántas veces ha vendido su producto al mismo comprador en el último año?	1 a 5 veces=0 Más de 5 veces =1	(+)
Asociación	Pertenece a alguna asociación de comercializadores	Sí (1) No (0)	(+)
Fletes	¿Se hace cargo del flete en la transacción?	Se hace cargo del flete (1) No se hace cargo del flete (0)	(+)
Merma	¿Ha tenido mermas en el producto?	Sí tuvo merma (1) No tuvo merma (0)	(+)
Mala experiencia	Vendió y no pudo cobrar	Sí (1); No. (0)	(-)
Asesoría jurídica	¿Usa asesoría jurídica?	Sí (1) No (0)	(+)
asesoría técnica.	¿Usa asesoría agronómica?	Sí (1); No (0)	(-)
Tipo de rendimiento	¿Obtuvo un rendimiento mayor a 30 canastillas por hectárea?	Sí (1) No (0)	(+)
Experiencia (años)	¿Cantidad de años en la actividad productora y comercializadora de mora?	Menos de 10 años (0) Más de 10 años (1)	(+)
Canhectcultivadas	Cantidad de hectáreas cultivadas	Menos de 10 hect. (0) Más de 10 hect. (1)	(+)
otras actividades	¿Realiza otras actividades productivas fuera de la mora?	Sí (1) No (0)	(-)
Conocimiento del mercado	¿Conoce a su cliente potencial?	Sí conoce a sus clientes (1) No conoce a sus clientes p(0)	(+)
Educación	Nivel de educación	Sin educación primaria (0) Secundaria o universitaria (1)	(+)

Fuente: Autores del proyecto.

Existen muchos modelos, pero en ellos existen un común denominador, la variable dependiente es discreta, por lo tanto, enlazan una decisión o un resultado con un conjunto de factores dentro del marco general de los modelos de probabilidad y se agrupan en dos categorías: binomiales y multinomiales, dependiendo de si el resultado de la elección tiene lugar entre dos alternativas o más. En el desarrollo del estudio se tiene en cuenta la primera, en la cual se utiliza el Logit Binario que permite analizar las decisiones de los agricultores entre dos alternativas: vender de contado o crédito; permite estimar la afectación de las variables y su probabilidad de observar una determinada categoría, y permite estimar distintas alternativas que tienen X_i características.

Con esta herramienta se mide el desempeño y resultados de la comercialización del fruto, y se observa si han incurrido en costos de transacción, con el fin de reducirlos y, por ende, obtener mayor rendimiento. El modelo Logit ayuda a la comunidad a evaluar sus procesos y cumplir mejor los requisitos para ser asertivos y competitivos dentro del mercado.

El fenómeno para analizar no es continuo sino discreto. Cuando se quiere modelar la frecuencia de venta de contado o crédito o la participación de los dueños de parcelas a las asociaciones, el flete, la satisfacción de las condiciones de venta, la mala experiencia, el rendimiento por hectárea, la realización de otras actividades agrícolas y la educación, podrán ser relevantes al explicar si un agricultor jefe de hogar está más afecto a adquirir costos de transacción o no.

Para reflejar esto, dentro del proyecto de estudio se realiza la formulación del modelo Logit con variable dependiente dicotómica (VDD), y se determina un segmento de variable explicativa o conjuntos de variables que explican este fenómeno, se toma la variable dependiente: en la comercialización de su producto ¿cómo vende? de contado = 1, ventas a crédito = 0.

Igualmente, se toma como variables independientes: frecuencia: relación comercial, asociación, fletes, merma, mala experiencia, asesoría

jurídica, asesoría técnica, tipo de rendimiento, problema, experiencia (años), canchectcultivadas otras, actividades, conocimiento del mercado y educación. Por lo tanto:

$$P_i = E(y = 1/X_i) = 1/1 + e^{-[b_1 + b_2 X]} \text{ donde } Z_i = [b_1 + b_2 X] \quad (11)$$

La ecuación representa, la función de distribución logística (acumulativa). Se verifica que a medida que Z_i se encuentra dentro de un rango de $-\infty$ a $+\infty$, P_i y dentro de un rango 0 a 1 y P_i no está linealmente relacionado con Z_i (es decir, con X_i) satisfaciendo requerimientos que son considerados. Si se presenta un problema de estimación, porque P_i es no lineal, no solamente con X sino también en los b , significa que este problema es más aparente que real porque es intrínsecamente lineal.

Si P_i , la probabilidad de vender de contado, está dada por $Z_i = [b_1 + b_2 X]$ entonces $(1 - P_i)$, la probabilidad de la venta a crédito. Entonces: $1 - P_i = 1/1 + e^{Z_i}$ por lo tanto, tenemos: $P_i / 1 - P_i = 1 + e^{Z_i} / 1 + e^{-Z_i} = e^{Z_i}$ Ahora si tomamos el logaritmo natural de e^{Z_i} se obtiene un resultado interesante, a saber: $L_i = L_n(P_i / 1 - P_i) = Z_i = b_1 + b_2 X$ entonces L_i , el logaritmo de la razón de probabilidades no es solamente lineal en X_i , sino también (desde el punto de vista de estimación) lineal en los parámetros, L es llamado Logit.

Las variables que rechazan la hipótesis nula de independencia entre ellas y la forma de venta son a un nivel del 5%: Frecuencia en la venta, es decir, vender más de 5 veces a un cliente aumenta la probabilidad de venta de contado (cuando la venta se hace a un cliente altamente frecuente, la probabilidad en la venta de contado aumenta en 337,9%, clientes potenciales, al rechazar la hipótesis nula, permite inferir que si es cliente potencial, la probabilidad de vender de contado aumenta en el 414,6%, realizar otras actividades también es otra variable que rechaza la hipótesis nula, es decir, que el cultivador de la mora en su gran mayoría realiza otras actividades como siembra de yuca, maíz, cría de gallinas, tomate de árbol, cítricos, el incremento en la venta de contado es de 403,4%. Tipo de rendimiento aumenta la probabilidad de vender de contado en el 269,7% y es significativo al 92% de confianza (nada despreciables).

Tabla 9. Modelo Logit

Variables en la ecuación							
	B	Error estándar	Wald	gl	Sig.	Exp(B)	
Paso 1a	Frecuencia	1,218	,520	5,479	1	,019	3,379
	Clientes P.	1,422	,590	5,820	1	,016	4,146
	Otras actividades	1,395	,558	6,238	1	,013	4,034
	MERMA	-,123	,689	,032	1	,858	,884
	Flete	,987	,611	2,612	1	,106	2,684
	A. jurídica	-,242	,540	,200	1	,654	,785
	Experiencia	-,282	,597	,222	1	,637	,755
	Hect cultiv.	-,368	,564	,426	1	,514	,692
	Asociación	,019	,609	,001	1	,975	1,019
	Asesoría técnica	-,265	,686	,149	1	,700	,767
	RENDIMIENTO	,992	,573	2,998	1	,083	2,697
	Mala experiencia	,449	,578	,602	1	,438	1,566
	Educación	-,880	,641	1,888	1	,169	,415
	Constante	-1,259	,912	1,905	1	,167	,284
a. Variables especificadas en el paso 1: Frecuencia, Clientes P. Otras actividades, MERMA, Flete, A. jurídica, Experiencia, hect cultiv., Asociación, Asesoría técnica, RENDIMIENTO, Mala experiencia, Educación.							

Fuente: Autores del proyecto.

Tabla 10. De clasificación

Tabla de clasificación ^a					
Observado			Pronosticado		
			Comercialización		Porcentaje
			Crédito	Contado	Correcto
Paso 1	Comercialización	Crédito	11	25	30,6
		Contado	5	93	94,9
Porcentaje global					77,6
a. El valor de corte es .500					

Fuente: Autores del proyecto.

Las variables que no rechazaron la hipótesis nula de independencia son: MERMA, pues tienen un P-value de 85%, flete 11%, asesoría jurídica 65%; igualmente, experiencia 64%; hectáreas cultivadas 51%; asociación 91%; asesoría técnica 70%; malas experiencias 44%; y educación 17%. Al excluir las variables que no son significativas el modelo econométrico arroja solamente tres variables altamente significativas para el caso de estudio. Estas variables específicas se encuentran en un rango del 95% de confianza.

Tabla 11. *Variables específicas*

Variables específicas						
	B	Error estándar	Wald	gl	Sig.	Exp(B)
Frecuencia	1,197	,457	6,854	1	,009	3,309
Clientes P.	1,260	,508	6,151	1	,013	3,527
Otras actividades	1,326	,453	8,577	1	,003	3,768
Constante	-,972	,418	5,411	1	,020	,378

Fuente: Autores del proyecto.

Tabla 12. *Clasificación*

Tabla de clasificación ^a					
Observado			Pronosticado		
			Comercialización		Porcentaje
			Crédito	Contado	Correcto
Paso 1	Comercialización	Crédito	17	19	47,2
		Contado	12	86	87,8
Porcentaje global					76,9
a. El valor de corte es .500					

Fuente: Autores del proyecto.

La tabla 12 nos indica el porcentaje de aciertos que tienen las variables independientes en la explicación de la forma de venta: contado o crédito. Nos dice que el tipo de venta (de contado o crédito) es explicado por las variables específicas: Frecuencia en la compra, clientes potenciales y el realizar otras actividades de forma paralela con la producción de mora en un 76,9% en promedio.

El impacto de estas variables de acuerdo con los coeficientes obtenidos nos dice: Frecuencia 3.30 significa que, si existe compra superior de un cliente a más de 5 veces, la probabilidad de vender de contado aumenta en 330 por ciento. Clientes potenciales 3.52, significa que si existe conocimiento de un cliente potencial (1), la probabilidad de vender de contado aumenta en el 352%. Realiza otras actividades 3.76, significa que, si el productor de mora realiza otras actividades de manera análoga a esta, la probabilidad de vender de contado aumenta en el 376%.

Conclusiones

Los resultados de la investigación llevan a inferir que los productores de mora en Bucaramanga y su área metropolitana son propietarios de pequeñas parcelas, en su mayoría con un grado de educación inferior, mucha experiencia en el cultivo de mora, pero desconfiados y sin ningún conocimiento del mercado, más aún, las dificultades que enfrentan por infraestructura, la poca colaboración del Estado colombiano, los altos costos de sus insumos; estos inconvenientes conducen a desarrollar actividades agrícolas poco rentables debido a que las decisiones que toman los agricultores están impregnadas de un alto nivel de incertidumbre.

Williansom expresa que los costos de transacción son diferentes en un mercado y dependen de los efectos que ciertos atributos observables tienen sobre estos (Williamson, 1995). La evidencia empírica muestra que los productores de mora venden de contado, lo que permite inferir el tamaño de la empresa, la inversión en activos fijos y la capacidad de generar relaciones estables con diferentes usuarios, proveedores, compradores, son limitadas, necesita incrementar las probabilidades de ar-

ricular transacciones más complejas (crédito), con el fin de aumentar su productividad, integrando las etapas posteriores o realizando acuerdos duraderos con otros eslabones de la cadena de valor.

Por otro lado, su idiosincrasia y vulnerabilidad los convierte en productores desconfiados que no están en condición de asumir riesgos, por tal razón prefieren vender de contado. La teoría sostiene que el productor debe adoptar formas contractuales de largo plazo que le aseguren una rentabilidad mínima con el fin de disminuir la incertidumbre, pero parece que la desconfianza es un común denominador en los productores santandereanos, que implica un aumento de los C.T hasta imposibilitar los acuerdos, por tal razón, sus rendimientos financieros son casi nulos.

Sin embargo, el medio local no reduce la incertidumbre, sino por el contrario favorece los comportamientos oportunistas, entonces es necesario que haya un cambio institucional que incentive la colaboración o cooperación entre productores, en la medida que sea posible comprender el comportamiento con relación a la forma de comercialización elegida y los factores que promueven o limitan los mecanismos de coordinación vertical. En este orden de ideas se podrá buscar acuerdos gubernamentales, municipales que favorezcan la articulación, para ello es necesario comprometer al gobierno municipal de Piedecuesta para que haga inversiones en la zona y mantenga las posibilidades de vinculación contractual.

Igualmente, es necesario mejorar el nivel de educación e incentivar a los productores a través de planes ofrecidos por el gobierno municipal, asociaciones de productores, u otros organismos, programas que incentiven formas asociativas de comercialización que permita aumentar el volumen vendido por los productores con menor capacidad financiera.

Referencias

- Goldberger, A.S., Wiley, J., y Sons. (1964). *Econometric Theory* (pp. 249-250).
- Demaris, A. (1972). *Logit Modeling, practical Applications*.

- Coase, R. H. (1937). The nature of the firm. *Económica*, 4(16), 386-405.
- Coase, R. H. (1994). *La empresa, el mercado y la ley*. Alianza Editorial.
- McFadden, D. (1973). Conditional Logit Analysis of Qualitative Choice Behavior. En P. Zarembka (ed.). *Frontiers in Econometrics*. Academic Press.
- Fuentes, G. R. H. (2017). Un recorrido por el Neoinstitucionalismo y sus autores destacados. *Revista Científica Visión de Futuro*, 21(2), 128-147.
- Garrido, J. M. O. (2019). *Derecho laboral*. (Doctoral dissertation, Universidad Nacional).
- Henríquez-Fuentes, G. R., Lombana-Coy, J., González-Ariza, A., Higuera-Ojito, V. H., Landázuri-Villalba, L., Rada-Llanos, J., ... y Simancas, R. A. (2018). *La gobernanza y su relación con la competitividad en una firma integrada a una cadena de suministro*.
- Idárraga, D. A. M. (2012). Teoría de agencia y costos de transacción: una observación teórica de sus postulados. *Revista Mutis*, 2(1), 61-81.
- Kramer, J.S. (1991). *The logit Model for Economists*. Edward Arnold Publishers.
- Aldrich, J., y Forrest, N. (s.f.). *Análisis de máxima verosimilitud en el contexto del modelo logit*.
- Monge, A. V., Cascante, A. C., Vega, M. M., y Madrigal, O. Q. (2020). Costos de transacción económica: análisis de una experiencia real de venta en línea de alimentos. *e-Agronegocios*, 6(2), 82-102.
- Menéndez, J. (2005). Acercamiento al enfoque teórico de los costos de transacción: *Revista Espacios Públicos*, 8(16), 140-156.
- Petrella, C., y Tessore, C. (2019). *El caso Toyota: acelerador defectuoso. Incertidumbre, riesgo y ética*.
- Ramírez, M. (2010). Costos de transacción y creación de empresas. *Revista Ciencias Estratégicas*, 18(23), 43-58.
- Shastitko, A., y Ménard, C. (2017). Discrete institutional alternatives: Theoretical and policy issues (Celebrating the 80th anniversary of Ronald Coase's "Nature of the Firm"). *Russian Journal of Economics*, 3(2), 200-220.
- Tapia, F. E. (2019). *Estrategia de integración vertical entre arroceros y agroindustriales del cantón Salitre* (Doctoral dissertation).
- Taborda, S. A. A., y Fernández, D. M. H. (2017). La integración productiva como factor de competitividad en el sector agropecuario colombiano. *Libre Empresa*, 9(1), 83-97.

- Amemiya, T. (1981). Qualitative Response Models. *Journal of Economic Literature*, 19, 331-354.
- Torrenegra, E. S. (2017). *¿Cuánta razón tiene el cliente?: manual práctico de servicio al cliente*. ej black.
- Williamson, O.E. (1991). *Mercados y jerarquías su análisis y sus implicaciones antitrust*. Fondo de Cultura Económica.
- Williamson, O. E. (1996). *The mechanisms of governance*. Oxford University Press.
- Williamson, O.E. (2002). The teory of the firm as governance structure: from choice to contrast. *Journal of Economic Perspectives*, 171-195.
- Wikipedia (s.f.). *Función logística*. es.wikipedia.org/wiki/función Logística.

Modelo matemático para la atención de desastres, inundación y remoción de masa en Bucaramanga

Karin Julieth Aguilar Imitola

*Facultad de Ingeniería Industrial, grupo de Investigación en Calidad y Productividad - CATPRO, Universidad Santo Tomás, Bucaramanga, Colombia,
Correo electrónico: karin.aguilar@ustabuca.edu.co*

Daniel Orlando Martínez Quezada

*grupo de Investigación en Mercados y Negocios Internacionales - GRIMENI, Universidad Autónoma de Bucaramanga, Bucaramanga, Colombia,
Correo electrónico: dmartinez582@unab.edu.co*

Introducción

En años recientes una gran parte de la población se ha visto afectada por desastres, tanto naturales como causados por el hombre. Solo en 2019 se presentaron 396 desastres naturales, causando la muerte de 11.755 personas, 95 millones de afectados y daños por US\$ 130 billones (Centre for Research on the Epidemiology of Disasters, 2020). En la legislación colombiana, la Ley 1523 de 2012 (Congreso de la República, 2012) define un desastre como el resultado que se desencadena de la manifestación de uno o varios eventos naturales o antropogénicos, que exige del Estado y del sistema nacional ejecutar acciones de respuesta a la emergencia, rehabilitación y reconstrucción (otras definiciones de desastre pueden ser consultadas en Blanchard (2008).

El departamento de Santander ha estado amenazado principalmente por fenómenos naturales hidrometeorológicos y geológicos. Varios muni-

cipios se han visto afectados por deslizamientos, uno de los procesos más rápidos de los movimientos de remoción en masa. Históricamente, en el departamento de Santander se han registrado más de 240 deslizamientos de los cuales 79 eventos corresponden al municipio de Bucaramanga. Mientras que, en el caso de inundaciones, entre los municipios santandereanos más afectados por esta amenaza se encuentra Puerto Wilches (44 eventos), Barrancabermeja (31 eventos) y Bucaramanga (24 eventos) (Secretaría de Planeación y - GIDROT, 2011).

El área metropolitana de Bucaramanga (AMB) está compuesta por los municipios de Bucaramanga (capital de Santander), Piedecuesta, Girón y Floridablanca, ubicados sobre un abanico aluvial compuesto de material de tendencia arenosa a lodosa; sumado a que la cobertura vegetal de Bucaramanga ha sido reemplazada en muchas áreas por construcciones desordenadas, asentamientos urbanos o por cultivos limpios, favoreciendo la ocurrencia de erosión, deslizamientos e inundaciones (Alcaldía de Bucaramanga, 2014). Así mismo, factores como el uso de cauces de inundación en proyectos de urbanización, utilización urbanística de la llanura del río, obstrucción de redes de alcantarillado, se asocian a emergencias por inundaciones (CMGRD de Bucaramanga, 2013). La exposición y la vulnerabilidad de algunas zonas del AMB, conllevan la materialización del riesgo, y que dado el caso, las probables pérdidas y víctimas pueden ser considerables, como ocurrió en 2005 en el municipio de Girón, producto del desbordamiento del río de Oro, que generó 50 muertos, 30 mil damnificados y 996 viviendas destruidas (Rozo, s.f.), así mismo, en el 2010 frente al fenómeno de La Niña, en AMB se presentaron 11.821 personas afectadas, 384 vivienda destruidas y 1273 viviendas averiadas (UNGRD, 2019).

Actualmente todos los municipios del AMB cuentan con la Estrategia Municipal para la Respuesta a Emergencias (EMRE) y Plan Municipal para la Gestión de Riesgo de Desastres (PMGRD); sin embargo, no responden a las necesidades de las ciudades en materia de preparación. El EMRE de Bucaramanga indica que la ubicación de alojamientos temporales debe obedecer a un análisis anticipado de los lugares con aptitud; y aunque contempla una lista de posibles lugares para albergar

damnificados, no se menciona bajo cuáles criterios se eligieron estos sitios y si son los más adecuados en relación con las zonas que resultarían más afectadas en situaciones de desastre (Alcaldía de Bucaramanga y CLOPAD, 2012). Así mismo, este documento lista los diferentes recursos con los que cuenta la ciudad para atender un desastre, pero no se especifica cuál será la estrategia para distribuir estos recursos entre la población afectada de manera que sea eficiente.

Después de un desastre, algunas viviendas pueden resultar destruidas o deterioradas, y muchas personas se quedan sin hogar, debido a que necesitan continuar con su cotidianidad, deben residir en lugares temporales hasta que se complete el proceso de recuperación de las zonas afectas. Por lo tanto, se establecen refugio o albergues, por la importancia de estos deben ser planificados estratégicamente (Kılıcı et al., 2015). En consecuencia, el desarrollo de un modelo para la selección y localización de albergues y la asignación de recursos sirve como base para la mejora de la operación y coordinación del proceso en situaciones de desastre. La decisión de ubicación de albergues se ha estudiado desde el problema de localización (construyendo nuevas instalaciones o eligiéndolas de un conjunto existente), mientras que las operaciones de asignación de recursos se han abordado con problemas de asignación (Caunhye et al., 2012). Con el propósito de facilitar la toma de decisiones en la gestión de desastres por inundaciones y remoción en masa en el AMB se plantea el diseño de un modelo matemático para las operaciones de localización de refugios y asignación de recursos, en la fase de preparación, dando respuesta a la pregunta ¿Dónde deben localizarse las instalaciones de ayuda y cómo debe realizarse la asignación de recursos de manera que se minimice el tiempo de respuesta? Por lo anterior, se propone la identificación de los requerimientos técnicos y de optimización de la herramienta mediante la revisión de literatura científica, la revisión de normatividad y lineamientos nacionales; así mismo, se priorizarán las zonas de mayor riesgo de inundación y remoción en masa de AMB, mediante documentación histórica, información primaria y secundaria, que permitan seleccionar las zonas en las que se enfocará la herramienta. Posteriormente se desarrolla el modelo matemático para la localización de instalaciones y la asignación de recursos.

El resto del capítulo está organizado como sigue: La sección 2 comprende el estado del arte de trabajos previos. En la sección 3 se establece la red de emergencia para la ciudad de Bucaramanga y su área metropolitana, compuesta por los potenciales albergues, los puntos de demanda y las amenazas por inundación y remoción en cada municipio. El modelo matemático para la localización de albergues y la asignación de recursos se presentan en la sección 4. Finalmente, la sección 5 comprende las conclusiones.

Estado del arte

En los últimos años la comunidad académica y profesional en OR/MS (Operational Research/Management Science) ha incrementado su interés en desarrollar sistemas logísticos ágiles capaces de atender diferentes tipos de desastres, buscando el aumento de la eficiencia y la eficacia de la respuesta al desastre y la reducción de los impactos.

Altay y Green (2006) fueron de los primeros en revisar la literatura existente en OR/MS para la gestión de las operaciones de desastre (DOM), con el objetivo de proponer futuras direcciones de investigación en este campo. En línea con este trabajo, en 2013 Galindo y Batta evaluaron cómo la investigación de operaciones ha evolucionado en materia de DOM, y en qué medida se han cubierto las brechas identificadas en Altay y Green (2006). Posteriormente, Lamos et al., (2019) contribuyeron complementado el estado del arte de la investigación OR/MS en DOM, dando continuidad al estudio de Galindo y Batta (2013), al revelar la aparición del uso de metodologías basadas en el análisis de datos y un incremento del estudio de las operaciones en la fase de recuperación y el estudio e inclusión de objetivos humanitarios en los modelos matemáticos. Desde la aparición de la revisión de Altay y Green (2006), diferentes autores han contribuido con artículos de revisión relacionados a la gestión de desastres y la logística humanitaria (Banomyong et al., 2019; Behl y Dutta, 2019; Dubey et al., 2019; Fosso, 2020; Kovács y Spens, 2007; Lettieri et al., 2009; Mishra et al., 2019; Overstreet et al., 2011; Özdamar y Ertem, 2015).

Dos de las decisiones que pueden impactar positivamente el tiempo de respuesta y la reducción del sufrimiento de los afectados, son la localización

de instalaciones y la asignación de recursos. El problema de localización busca determinar la ubicación de instalaciones destinadas a atender un conjunto de clientes determinado, modelado mediante el problema de la p-mediana (Dantrakul et al., 2014; Mladenović et al., 2007), el problema de cobertura máxima y sus variantes (Farahani et al., 2012; Li et al., 2011), el problema de localización de instalaciones (Boonmee et al., 2017; Trivedi y Singh, 2018), entre otros. Por su parte, el problema de asignación de recursos tiene como propósito encontrar la asignación óptima de una cantidad fija de recursos a actividades o puntos de demanda, para minimizar el costo total de la asignación (Kato et al., 2013).

Diversos estudios se han llevado a cabo en el tema, considerando diferentes restricciones, objetivos y variantes. Respecto a las restricciones, se encuentran principalmente enfocadas al uso de múltiples recursos o instalaciones como lo abordan (Altay, 2013; Zhang et al., 2012). Ghasemi et al. (2019) proponen un modelo de localización-asignación incierto multiobjetivo, multiproducto, multiperiodo y multivehículo que incluye planificación de evacuación y es solucionado mediante tres métodos distintos. Otros estudios abordan la asignación de recursos vitales durante desastres como recursos médicos (Paul y MacDonald, 2016) o suministro de sangre (Fereiduni y Shahanaghi, 2016). Diferentes objetivos matemáticos han sido estudiados, siendo la satisfacción de la demanda el más abordado (Bai, 2016; Barzinpour y Esmaili, 2014; Holguín-Veras et al., 2012; Rezaei-Malek et al., 2016; Salman y Gül, 2014). En los últimos años diferentes autores han incorporado objetivos de carácter humanitario en sus investigaciones, como el costo social. Holguín-Veras et al. (2013) analizan el uso de costos sociales como función objetivo para modelos logísticos humanitarios. Definiendo el costo social como la sumatoria de los costos logísticos y de privación, entendiendo por costo de privación la valoración económica del sufrimiento humano asociado con la falta de acceso a un bien o servicio. Otros autores que utilizan el costo social dentro de su función objetivo en problemas de localización y asignación son (Cotes y Cantillo, 2019; Khayal et al., 2015; Loree y Aros-Vera, 2018; McCoy y Lee, 2014; Pradhananga et al., 2016). Otros estudios incluyen múltiples objetivos (Maharjan y Hanaoka, 2020; Pouraliakbari-Mamaghani et al., 2018; Zhao et al., 2019).

Red de Emergencias para Bucaramanga y AMB

Esta investigación se centra en los municipios que conforman la denominada área metropolitana de Bucaramanga (AMB). Fue creada mediante la Ordenanza N° 020 del 15 diciembre de 1981 por la Asamblea de Santander, conformada por Bucaramanga, Floridablanca y Girón, en 1985 se integra al municipio de Piedecuesta. En la tabla 13 se presenta la información demográfica principal de cada municipio. En la figura 61 se presentan el mapa del AMB.

Tabla 13. *Información demográfica de los municipios que conforman el AMB*

Municipios del AMB				
Datos demográficos	Bucaramanga	Floridablanca	Girón	Piedecuesta
Población (# de hab.)	581.130	267.170	160.403	117.364
Superficie (km ²)	162	97	475,14	344
Densidad (hab/km ²)	3587,22	2754,33	337,59	308,85

Fuente: Elaboración propia.

Figura 61. *Municipios del área metropolitana de Bucaramanga*



Fuente: Página oficial del área metropolitana de Bucaramanga. Milenioscuro, CC BY-SA 4.0 <<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>>, via Wikimedia Commons

Albergues

En este estudio se consideran albergues temporales comunitarios del tipo infraestructura instalada; es decir, ubicaciones existentes que cuentan con los servicios básicos para el alojamiento de personas o pueden ser adaptadas específicamente para este fin. En cada municipio se identifican los potenciales sitios de albergues, se incluyen, instituciones de educación de carácter público, zonas verdes (parques y áreas verdes) y zonas deportivas (coliseos, estadios y canchas), los cuales son considerados, de acuerdo con el Manual Nacional para el Manejo de Albergues temporales de la Cruz Roja Colombia, como lugares aptos para el refugio transitorio de comunidades afectadas por desastres. Cabe aclarar que, aunque la normativa colombiana vigente prohíbe el uso de instituciones educativas para ser usadas como refugios temporales, históricamente se han utilizado para tal fin, no solo a nivel local, sino que es común su uso en otros países, por lo que entran dentro del listado de posibles albergues. Para establecer esta información, se solicitó la lista de instituciones educativas públicas a cada municipio, en el caso de Bucaramanga se obtuvo mediante la Secretaría de Educación, una lista que indicaba el nombre de la institución, el número de aulas de clase y su área en m^2 , las áreas deportivas de la institución y su área en metros cuadrados, así como el área en m^2 destinada a servicios sanitarios. Mientras que, para los otros municipios, se hizo un barrido de información mediante Google Maps, que permitió establecer el área con la que contaba la institución, haciendo el cálculo de la capacidad para albergar, menos exacto. El procedimiento anterior se utilizó para establecer el área de las zonas deportivas y zonas verdes en los 4 municipios.

Para estimar la capacidad (δ) de los potenciales albergues, se hizo una aproximación del número de personas que podrían ser albergadas, considerando el tipo de instalación y el requerimiento de zonas comunes. La tabla 14 presenta las fórmulas usadas para la cuantificación de la capacidad de los albergues, estas son tomadas de Lamos et al., (2018). Donde A es el área total de la instalación, en el caso de las instituciones educativas corresponde únicamente a la suma de las áreas de las aulas de clase. ϵ es un parámetro que indica el porcentaje que se extrae del área

total y que se asume corresponde a las zonas comunes, para las zonas verdes, incluye la arborización. Finalmente, β es el área mínima en un albergue destinada para una persona ($3,5\text{m}^2$) de acuerdo con la Cruz Roja Colombiana.

Tabla 14. *Cálculo de la capacidad para albergar personas de una instalación*

Instalaciones deportivas	Zonas verdes	Instalaciones educativas
$\delta = \frac{A - (A * \epsilon)}{\beta}$	$\delta = \frac{A - (A * \epsilon)}{\beta}$	$\delta = \frac{A}{\beta}$

Fuente: Lamos et al. (2018).

Parámetros de calidad

En la literatura existen una gran variedad de estudios que buscan establecer los criterios para la ubicación o selección de instalaciones en casos de desastres. Costa et al. (2017) argumentan que el amplio rango de requerimientos que deben ser considerados en la selección de albergues es uno de los desafíos más significativos para la planeación de la ayuda humanitaria. Así mismo, Hosseini et al. (2016) mencionan que la literatura académica y profesional relacionada con la evaluación del desempeño de albergues temporales, generalmente se centra en estándares espaciales mínimos y vulnerabilidad social; sin embargo, se sabe que dentro de los requerimientos se contempla no solo atributos técnicos, sino también culturales.

De acuerdo con la literatura revisada se establecen 9 ítems como los principales criterios para la selección de instalaciones de albergues temporales (Celik, 2017; Nappi et al., 2019; Nappi y Souza, 2014).

- *Seguridad:* Las instalaciones al ser consideradas como albergues deben poder resistir un desastre y dar la seguridad de todos, por lo que los albergues deben estar ubicados en lugares lejanos a las zonas de peligro donde el riesgo sobre las personas y suministros sea mínimo.

- *Infraestructura urbana:* Es necesario que se encuentren ubicados con disponibilidad a la infraestructura urbana, como la recolección de residuos, sistema de alcantarillado, y acceso a sistemas de suministro de agua.
- *Adecuación física:* Deben contar con estándares mínimos de espacio, y condiciones que permitan realizar las actividades domésticas esenciales para la supervivencia, como cocinar, asearse, etc.
- *Adecuación cultural:* Las instalaciones deben promover el confort social y cultural de los afectados, es decir, los requerimientos y necesidades por atender deben ser aceptados culturalmente.
- *Privacidad:* Los albergues temporales deben proporcionar seguridad, privacidad y dignidad a las víctimas, por lo que debe, si es posible, separar los espacios dentro de las instalaciones.
- *Confort ambiental:* La instalación debe asegurar el confort térmico, ventilación y protección de las víctimas en relación con la situación de desastre que se está presentando y condiciones climáticas.
- *Accesibilidad universal:* Los albergues deben ser establecidos en zonas de fácil acceso para la recepción de ayudas y equipo médico.
- *Aspectos económicos:* Se debe considerar el costo de adecuación, mantenimiento, acceso y apertura a las instalaciones.
- *Localización:* Las instalaciones deben proporcionar acceso a centros de salud, supermercados, escuelas, así como otros servicios necesarios para el desarrollo de la cotidianidad de los afectados. Así mismo, considerar el área de cobertura de la zona de peligro.

Para la selección de los posibles puntos de albergues de cada municipio se consideraron únicamente los criterios de adecuación física, infraestructura urbana y accesibilidad universal, ya que realizar la evaluación de todos los criterios mencionados se sale del alcance del presente trabajo, aunque podría representar un producto significativo en la planeación de la respuesta a desastres.

Albergues en el AMB

Se hizo la representación cartográfica de los albergues utilizando el sistema de información geográfica Google Earth (figura 62) y a partir de esto se asignó la capacidad como atributo, se presenta resumen de los registros, tanto por tipo como por municipalidad en las tablas 15 y 16.

Figura 62. Geolocalización de los albergues en cada municipio del AMB



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 15. Resumen de capacidad instalada de albergues por tipo y municipio

Tipo de albergue	Bucaramanga	Floridablanca	Girón	Piedecuesta	Total general
Iglesias		2.495	2.064		4.559
Instituciones de educación	38.807	23.566	22.026	35.886	120.285
Instituciones del Estado		1.118	811		1.929
Zonas deportivas	4.781	12.244	1.109	10.445	28.579
Zonas verdes	17.644	3.718	3.254	6.408	31.024
Total general	61.232	43.141	29.264	52.739	186.376

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 16. *Resumen de cantidad de albergues por tipo y municipio*

Tipo de albergue	Bucaramanga	Floridablanca	Girón	Piedecuesta	Total general
Iglesias		1	2		3
Instituciones de educación	41	9	17	19	86
Instituciones del Estado		1	1		2
Zonas deportivas	5	4	2	8	19
Zonas verdes	15	3	2	6	26
Total general	61	18	24	33	136

Fuente: Elaboración propia.

Puntos de demanda

Se geolocalizaron las manzanas censales y se utilizó la información disponible del Censo Nacional del DANE para alimentar el número de personas que habitan en las manzanas de cada municipio. Mediante la herramienta Google Earth se generaron los polígonos correspondientes a cada manzana, una representación de la ubicación de estos puntos se muestra en la figura 63.

Figura 63. *Geolocalización de polígonos por manzana censal en el AMB*



Fuente: Elaboración propia.

Amenazas

Dado que esta investigación se centra en las amenazas por inundación y remoción en masa, mediante la revisión de los documentos EMRE, Plan de Ordenamiento Territorial (POT), PMGRD de cada municipio, así como el informe amenaza departamental para los principales escenarios de riesgos, Santander, además de la revisión de los mapas de amenazas suministrados por la Alcaldía de Bucaramanga, se identifican las zonas con mayor riesgo para cada una de las amenazas estudiadas. Con la información obtenida se identifican estas zonas en el mapa del AMB como se presenta en la figura 64. La información consolidada de los mapas se puede ver en <https://www.google.com/maps/d/edit?mid=1qqzZB4naA6j9aTX6IBBwW7ECZ1Gp9fOQ&usp=sharing>

Figura 64. Geolocalización de zonas de riesgo por inundación y remoción en masa del AMB



Fuente: Elaboración propia.

Modelo matemático para el problema de localización-asignación

Esta investigación busca diseñar un modelo matemático que permita ubicar albergues temporales y asignar a ellos la población afectada en

desastres por inundación o remoción en masa. Una vez establecidos los albergues, estos deben tener condiciones de operabilidad, por lo que requieren recursos básicos para la atención adecuada de las personas afectadas, estos recursos se encuentran disponibles en sitios previamente establecidos como centros de distribución, o son consolidados con base en las donaciones realizadas por diferentes organizaciones.

Supuestos del modelo

Es necesario establecer ciertas condiciones que se deben cumplir para que el modelo propuesto presente una solución a los problemas de gestión de desastres.

- El problema incluye la apertura de albergues que serán asignado a nodos de demanda agregados, es decir, la población de cada manzana censal se ubicará en el centroide de esta. Un porcentaje de la población afectada en cada área será considerado para ser evacuado a albergues temporales, este valor es un parámetro del problema, pero debe obedecer a las condiciones del desastre y el impacto sobre la población de acuerdo con su magnitud.
- El tiempo de viaje entre los nodos de demanda agregada (NDA) y los albergues habilitados, se asume como un valor conocido y corresponde al tiempo esperado de tránsito alineado a un análisis de vulnerabilidad de la red.
- Tanto los albergues como los DC se encuentran en zonas evaluadas como bajo riesgo, de acuerdo con las amenazas establecidas.
- Se asegura que la demanda de los recursos para cada albergue no puede superar su capacidad de almacenamiento.
- El problema contempla centros de distribución (DC) en los cuales se tendrán disponibles un número limitado de recursos de cada

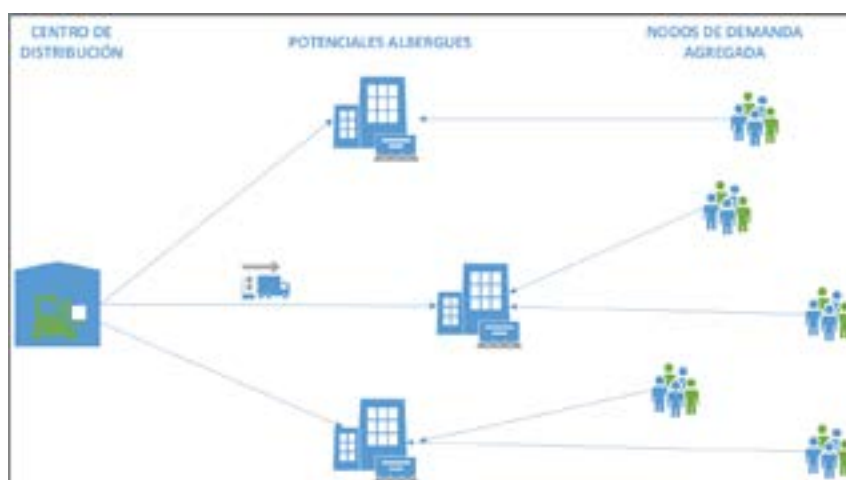
tipo. Se asume que en este lugar se consolidan y gestionan los recursos que requieren los albergues para su operación.

- La demanda de recursos en cada albergue es conocida con anticipación y no varía en el tiempo, es decir, el número de personas afectadas que son asignadas y requieren recursos no se modifica durante el análisis.
- El problema considera que los desastres en el AMB pueden ocurrir de manera simultánea, y que las entidades locales actuarán en colaboración con sus municipios vecinos.

Modelo matemático con único DC

Con base en los supuestos planteados, el modelo inicialmente contempla un solo centro de distribución en cada municipio de AMB, y plantea que cada uno abastece su población al momento de ocurrir el desastre sin cooperación, tal como se presenta en la figura 65.

Figura 65. Esquema de un problema con un único centro de distribución



Fuente: Elaboración propia.

Parámetros del problema

Se consideran los parámetros presentados en la tabla 17.

Tabla 17. Notación utilizada en la formulación matemática

Símbolo	Descripción
DC	Centro de distribución 0
S	Conjunto de nodos de los potenciales albergues $j = 1, \dots, s$
N	Conjunto de nodos de demanda agregada (NDA) $i = 1, \dots, N$
K	Conjunto de recursos tipo k
D_i	Población que requiere albergar ubicada en el NDA $i \in N$
d_j^k	Demanda del recurso tipo k en el albergue $j \in S$
F_j	Costo fijo de habilitar el albergue $j \in S$
Q_j	Capacidad para albergar personas en el albergue $j \in S$
t_{ij}	Tiempo de viaje desde el NDA $i \in N$ al albergue $j \in S$
p_j^k	Costo unitario de la penalización por no satisfacer la demanda en $j \in S$ de recurso tipo k
H^k	Capacidad total de almacenamiento del recurso tipo k en el DC 0
c_{ij}	Costo por unidad de tiempo de moverse desde el NDA $i \in N$ hasta el albergue habilitado $j \in S$

Fuente: Elaboración propia.

Variables de decisión

Para el problema de localización y asignación de albergues se establecen

y_j	1 si el albergue j es habilitado, 0 en caso contrario
x_{ij}	1 si el NDA i es asignado al albergue habilitado j , 0 en caso contrario

Mientras que para el problema de asignación de recursos se definen

z_{0j}^k	Cantidad de recurso tipo k enviado desde 0 a albergue habilitado j
w_{0j}^k	Total de recurso k satisfecho por el DC enviado al albergue habilitado j

No se considera una variable de asignación entre el DC y el albergue habilitado, puesto que solo existe un depósito que asistiría los albergues abiertos.

Función objetivo y restricciones

La función objetivo del problema busca la minimización de los costos totales y se define según la ecuación 1.

$$\text{Min} \sum_{j=1}^S F_j y_j + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^S x_{ij} t_{ij} c_{ij} + \sum_{j=1}^S \sum_{k=1}^K p_j^k [d_j^k - w_{0j}^k] \quad (1)$$

Sujetos a las siguientes restricciones:

Asociadas al problema de localización y asignación

$$\sum_{j=1}^J x_{ij} = 1 \quad \forall i \in N \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^N D_i x_{ij} \leq Q_j y_j \quad \forall j \in S \quad (3)$$

$$x_{ij} \leq y_j \quad \forall i \in N, \forall j \in S \quad (4)$$

Asociadas a la asignación de recursos

$$\sum_{j=1}^S z_{0j}^k \leq H_0^k \quad \forall k \in K \quad (5)$$

$$\sum_{k=1}^K s^k z_{0j}^k \leq c_j y_j \quad \forall j \in S \quad (6)$$

$$y_j \in \{0, 1\} \quad (7)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\} \quad (8)$$

$$z_{0j}^k \geq 0 \quad (9)$$

$$w_{0j}^k \geq 0 \quad (10)$$

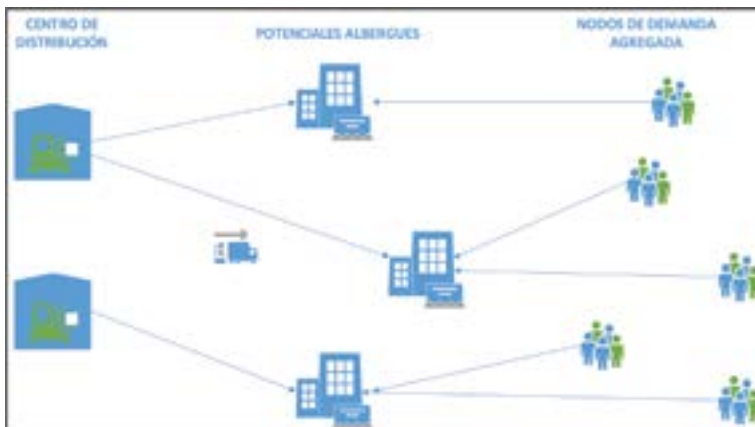
La función objetivo (1) minimiza los costos totales, el primer término corresponde al costo de operación del albergue habilitado, el segundo

término determina el costo de moverse hasta el albergue y, finalmente, el último término hace relación al costo de la no satisfacción de la demanda. La restricción (2) asegura que cada punto de demanda agregada debe ser asignado a un único albergue. La capacidad de un albergue, dada en número de personas que puede albergar, no puede ser excedida por los puntos de demanda asignados a este, se cumple mediante la restricción (3). La restricción (4) implica que para poder atender al punto de demanda i se debe habilitar el albergue j . La restricción (5) asegura que los recursos asignados desde el DC a cada albergue j , no pueden exceder la disponibilidad de estos en el DC . La restricción (6) se asocia a la capacidad de almacenamiento del albergue. Las restricciones de (7) a (10) establecen la naturaleza de las variables.

Modelo matemático con múltiples DC

Se revisa una variación del problema que se considera cooperación entre los municipios, lo que implica que existe más de un centro de distribución disponible para el envío de recursos, por lo que se piensa que varias zonas de diferentes municipios del AMB son afectadas por un desastre y los recursos pueden ser enviados desde cualquier DC de acuerdo con la disponibilidad y costo, esto se presenta en la figura 66.

Figura 66. Esquema de un problema con varios centros de distribución



Fuente: Elaboración propia.

La modificación propuesta implica que se deben incorporar nuevos parámetros al modelo presentado en la sección 4.2

Los parámetros nuevos cuando existen múltiples DC serían los siguientes

M	Conjunto de centros de distribución DC $m = 1, \dots, M$
C_{mj}^k	Costo por unidad transportada del recurso tipo k desde el DC m al albergue $j \in S$
H_m^k	Capacidad total de almacenamiento del recurso tipo k en el DC $m \in M$
τ_{mj}	Tiempo de viaje desde el DC $m \in M$ al albergue $j \in S$

Así mismo se modifican las variables existentes relacionadas a la asignación de recurso y se incorpora una variable de asignación

r_{jm}	1 si el albergue j es asignado para ser abastecido por el DC $m \in M$
z_{mj}^k	Cantidad de recurso tipo k enviado desde el DC $m \in M$ hacia el albergue habilitado j
w_{mj}^k	Total de recurso k satisfecho por el DC m enviado al albergue habilitado j

La inclusión de los nuevos parámetros y variables implica un cambio en la función objetivo del problema en el que además de los costos mencionados en (1) se agrega el costo de enviar un producto desde cada DC a un albergue como se presenta en la ecuación (11).

$$\text{Min} \sum_{j=1}^S F_j y_j + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^S x_{ij} t_{ij} c_{ij} + \sum_{m=1}^M \sum_{j=1}^S \sum_{k=1}^K c_{mj}^k z_{mj}^k + \sum_{j=1}^S \sum_{k=1}^K p_j^k [d_j^k - w_{mj}^k] \quad (11)$$

Las restricciones (5) y (6) son modificadas mediante las ecuaciones (14) y (15) y se incorpora una nueva restricción.

$$\sum_{m=1}^M r_{jm} = 1 \quad \forall j \in S \quad (12)$$

$$r_{jm} \leq y_j \quad \forall j \in S, m \in M \quad (13)$$

$$\sum_{j=1}^S z_{mj}^k \leq H_m^k \quad \forall k \in K, \forall m \in M \quad (14)$$

$$\sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M s^k z_{mj}^k \leq c_j y_j \quad \forall j \in s \quad (15)$$

$$r_{jm} \in \{0, 1\} \quad (16)$$

$$z_{mj}^k \geq 0 \quad (17)$$

$$w_{mj}^k \geq 0 \quad (18)$$

La ecuación (12) asegura que únicamente un DC puede servir a cada albergue. La restricción (13) garantiza que, si un albergue j no es localizado, entonces, el conjunto de vínculos o arcos entre ese nodo y el DC no está disponible. Las ecuaciones (14) y (15) incorporan la posibilidad de que los recursos enviados a los albergues habilitados vengan de un DC $m \in M$. Las restricciones (16) a (18) se relacionan con la naturaleza de las variables.

Requerimientos de los modelos

Muchos de los parámetros establecidos en los modelos propuestos son datos que aún no son conocidos por las entidades municipales para la gestión del riesgo. Aquí se indica cuáles son los estudios o análisis que se requieren conocer para alimentar el modelo.

- *Demanda.* Aunque en esta investigación se plantea una aproximación al conocimiento de la población que podría estar afectada mediante la ubicación de las manzanas censales en cada municipio, se requiere de un análisis al impacto sobre la población para cada tipo de amenaza. Así mismo, establecer los recursos que cada potencial albergue requeriría como básicos para iniciar su operación en caso de un desastre, además de establecer los niveles locales de cada tipo de recurso.
- *Tiempos y costos.* A la fecha ningún municipio cuenta con un estudio de vulnerabilidad vial que permita establecer el comportamiento de las vías en cada tipo de amenaza, el posible colapso u obstáculos que se puedan presentar, de manera que sea posible establecer el tiempo de viaje en distintos modos de transporte.

El costo de moverse en cada arco de la red, debe obedecer a un análisis que permita estimarlo con base en el riesgo de desplazamiento. El costo de penalización por la no satisfacción de la demanda, requiere un estudio detallado desde el punto de vista de los costos de privación, de forma que pueda reflejar adecuadamente el sufrimiento humano; establecerla implica un estudio con bases económicas y sociales que se sale del alcance de esta investigación.

- *Conjunto de instalaciones.* Uno de los supuestos del problema es que las instalaciones involucradas en el modelo están ubicadas en zonas de bajo riesgo, esto se verifica evitando elegir nodos que se ubiquen en zonas de amenaza alta en el mapa de cada municipio; sin embargo, sería adecuado un estudio enfocado a verificar el cumplimiento de requisitos básicos para comprobar la seguridad de las instalaciones, que incluya el cumplimiento de normas de sismo resistencia, año de construcción de la instalación, renovaciones, etc.

Conclusiones

En el presente capítulo se muestra identificación de los requerimientos técnicos y de optimización de la herramienta mediante la revisión de literatura científica y normatividad; así mismo, se tomaron las zonas de mayor riesgo de inundación y remoción en masa del AMB, esto permitió desarrollar un modelo matemático para la localización de instalaciones y la asignación de recursos. Lo anterior con miras a contribuir a la pregunta de “¿Dónde deben localizarse las instalaciones de ayuda y cómo debe realizarse la asignación de recursos de manera que se minimice el tiempo de respuesta?” la presente investigación plantea los requerimientos y directrices para el desarrollo de una herramienta computacional que permita dar respuesta a la pregunta planteada.

La revisión de la información obtenida de cada municipio del AMB, evidenció la falta de planeación basada en herramientas para la toma de decisiones y la necesidad de fortalecer los lazos Universidad-Estado para

la continuidad de proyectos enfocados en mejorar la calidad de vida de los ciudadanos. Para la selección de albergues temporales se encuentra que existen diferentes criterios para la selección de instalaciones con la aptitud para albergar personas en situaciones de desastre, se identificaron 9 como los más usados en la literatura; sin embargo, en este estudio se eligieron los posibles albergues con base en 3 de ellos. Se requiere de un estudio que evalúe mediante técnicas, como la ponderación de factores, la calidad de cada una de las instalaciones para mejorar la lista de potenciales albergues en cada municipio. Así mismo, en la literatura se identificaron modelos matemáticos específicos para la selección de albergues, lo cual podría complementar el desarrollo del problema abordado en esta investigación.

Se planteó un modelo matemático para el problema de localización de albergues, asignación de afectados y asignación de recursos. El modelo podría ser mejorado si se considera el costo del riesgo asociado a la apertura de una instalación, lo cual requiere la vulnerabilidad de las instalaciones en relación con la amenaza en estudio. Establecer la vulnerabilidad de cada zona donde están ubicados los posibles albergues requiere de información adicional para su definición, así como el uso de otras técnicas relacionadas al análisis de datos.

Se recomienda ampliar cada problema mediante un enfoque multiobjetivo que permita revisar objetivos contrarios, pero fundamentales en la logística de desastre, por ejemplo, el aumento de la satisfacción de la demanda y la reducción de los costos de implementar los programas de preparación. Así mismo, se puede incorporar a la modelación la incertidumbre de la información al momento de presentarse desastres mediante modelación estocástica o datos fuzzy. Los mapas creados sirven como base para el desarrollo de una herramienta computacional que facilite la toma de decisiones e incorpore técnicas de optimización con análisis de datos. Es recomendable realizar en la región estudios de demanda, vulnerabilidad de la red vial y costos de operación por amenaza, ya que las condiciones de cada situación afectan el desarrollo de las operaciones de desastres.

Referencias

- Alcaldia de Bucaramanga. (2014). *Plan de Ordenamiento Territorial Bucaramanga 2014-2027*. Acuerdo 011 de 2014.
- Alcaldia de Bucaramanga. (2019). *Plan de Desarrollo de Bucaramanga 2016-2019*.
- Alcaldia de Bucaramanga, y CLOPAD, C. L. de P. y A. de Desastres. (2012). *Estrategia Municipal para la Respuesta a Emergencias*.
- Altay, N. (2013). Capability-based resource allocation for effective disaster response. *IMA Journal of Management Mathematics*, 24(2), 253-266. <https://doi.org/10.1093/imaman/dps001>
- Altay, N., y Green, W. G. (2006). OR/MS research in disaster operations management. *European Journal of Operational Research*, 175(1), 475-493. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2005.05.016>
- Bai, X. (2016). Two-Stage Multiobjective Optimization for Emergency Supplies Allocation Problem under Integrated Uncertainty. *Mathematical Problems in Engineering*, 1-13. <https://doi.org/10.1155/2016/2823835>
- Banomyong, R., Varadejsatitwong, P., y Oloruntoba, R. (2019). A systematic review of humanitarian operations, humanitarian logistics and humanitarian supply chain performance literature 2005 to 2016. In *Annals of Operations Research* (Vol. 283, Issues 1-2, pp. 71-86). Springer. <https://doi.org/10.1007/s10479-017-2549-5>
- Barzinpour, F., y Esmacili, V. (2014). A multi-objective relief chain location distribution model for urban disaster management. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 70(5-8), 1291-1302. <https://doi.org/10.1007/s00170-013-5379-x>
- Behl, A., y Dutta, P. (2019). Humanitarian supply chain management: a thematic literature review and future directions of research. *Annals of Operations Research*, 283(1-2), 1001-1044. <https://doi.org/10.1007/s10479-018-2806-2>
- Blanchard, B. W. (2008). *Guide To Emergency Management and Related Terms, Definitions, Concepts, Acronyms, Organizations, Programs, Guidance, Executive Orders & Legislation*. 1-1366. [http://training.fema.gov/EMIWeb/edu/docs/terms and definitions/Terms and Definitions.pdf](http://training.fema.gov/EMIWeb/edu/docs/terms%20and%20definitions/Terms%20and%20Definitions.pdf)
- Boonmee, C., Arimura, M., y Asada, T. (2017). Facility location optimization model for emergency humanitarian logistics. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 24(January), 485-498. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2017.01.017>

- Campos, A., Holm-Nielsen, N., Díaz, C., Rubiano, D., Costa, C., Ramírez, F., y Dickson, E. (2012). *Análisis de la gestión del riesgo de desastres en Colombia - Un aporte para la construcción en políticas públicas*. <http://www.sigpad.gov.co/sigpad/archivos/ResumenGESTIONDELRIESGO.pdf>
- Caunhye, A. M., Nie, X., y Pokharel, S. (2012). Optimization models in emergency logistics: A literature review. *Socio-Economic Planning Sciences*, 46(1), 4-13. <https://doi.org/10.1016/j.seps.2011.04.004>
- Celik, E. (2017, February). A cause and effect relationship model for location of temporary shelters in disaster operations management. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 22, 257-268. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2017.02.020>
- Centre for Research on the Epidemiology of Disasters. (2020). Disaster Year in Review 2019. *Cred*, 58, 1-2.
- CMGRD de Bucaramanga. (2013). *Plan Municipal de Gestión del Riesgo de Desastre Municipio de Bucaramanga (Santander)*.
- Congreso de la Republica, C. (2012). *Ley 1523 de 2012*. 48.
- Costa, F. G. da, Flauzino, R. F., Navarro, M. B. M. de A., y Cardoso, T. A. de O. (2017). Abrigos temporários em desastres: a experiência de São José do Rio Preto, Brasil. *Saúde Em Debate*, 41(spe2), 327-337. <https://doi.org/10.1590/0103-11042017s227>
- Cotes, N., y Cantillo, V. (2019). Including deprivation costs in facility location models for humanitarian relief logistics. *Socio-Economic Planning Sciences*, 65, 89-100. <https://doi.org/10.1016/j.seps.2018.03.002>
- CRED. (2020). *EM DATA The International Disaster Database*. www.emdat.be (D. Guha-Sapir).
- Dantrakul, S., Likasiri, C., y Pongvuthithum, R. (2014). Applied p-median and p-center algorithms for facility location problems. *Expert Systems with Applications*, 41(8), 3596-3604. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2013.11.046>
- DNP, D. N. de P. (2018). Índice Municipal de Riesgo de Desastres de Colombia. En *Documento CONPES 3582*. <https://doi.org/https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/La%20politica%20generacin%20de%20ingresos/Cartilla%20Plan%20de%20Desarrollo%20Territorial.pdf>
- Dubey, R., Gunasekaran, A., y Papadopoulos, T. (2019). Disaster relief operations: past, present and future. *Annals of Operations Research*, 283(1-2). <https://doi.org/10.1007/s10479-019-03440-7>

- Farahani, R. Z., Asgari, N., Heidari, N., Hosseini, M., y Goh, M. (2012). Covering problems in facility location: A review. *Computers and Industrial Engineering*, 62(1), 368-407. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2011.08.020>
- Fereiduni, M., y Shahanaghi, K. (2016). A robust optimization model for blood supply chain in emergency situations. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 535-554. <https://doi.org/10.5267/j.ijiec.2016.5.002>
- Fosso Wamba, S. (2020). Humanitarian supply chain: a bibliometric analysis and future research directions. *Annals of Operations Research*. <https://doi.org/10.1007/s10479-020-03594-9>
- Galindo, G., y Batta, R. (2013). Review of recent developments in OR/MS research in disaster operations management. *European Journal of Operational Research*, 230(2), 201-211. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2013.01.039>
- Ghasemi, P., Khalili-Damghani, K., Hafezolkotob, A., y Raissi, S. (2019). Uncertain multi-objective multi-commodity multi-period multi-vehicle location-allocation model for earthquake evacuation planning. *Applied Mathematics and Computation*, 350, 105-132. <https://doi.org/10.1016/j.amc.2018.12.061>
- Holguín-Veras, J., Jaller, M., Van Wassenhove, L. N., Pérez, N., y Wachtendorf, T. (2012). On the unique features of post-disaster humanitarian logistics. *Journal of Operations Management*, 30(7-8), 494-506. <https://doi.org/10.1016/j.jom.2012.08.003>
- Holguín-Veras, J., Pérez, N., Jaller, M., Van Wassenhove, L. N., y Aros-Vera, F. (2013). On the appropriate objective function for post-disaster humanitarian logistics models. *Journal of Operations Management*, 31(5), 262-280. <https://doi.org/10.1016/J.JOM.2013.06.002>
- Hosseini, S. M. A., de la Fuente, A., y Pons, O. (2016). Multicriteria Decision-Making Method for Sustainable Site Location of Post-Disaster Temporary Housing in Urban Areas. *Journal of Construction Engineering and Management*, 142(9), 04016036. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0001137](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001137)
- Katoh, N., Shioura, A., y Ibaraki, T. (2013). Resource allocation problems. In *Handbook of Combinatorial Optimization* (Vols. 5-5, pp. 2897-2988). Springer New York. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-7997-1_44
- Khamis, M., y Osorio, C. (2013). América del Sur: una visión regional de la situación de riesgo de desastres. En *UNIRDS: Oficina de las Naciones Unidas para la reducción del riesgo de desastres*.
- Khayal, D., Pradhananga, R., Pokharel, S., y Mutlu, F. (2015). A model for planning locations of temporary distribution facilities for emergency respon-

- se. *Socio-Economic Planning Sciences*, 52, 22-30. <https://doi.org/10.1016/j.seps.2015.09.002>
- Kılıcı, F., Kara, B. Y., y Bozkaya, B. (2015). Locating temporary shelter areas after an earthquake: A case for Turkey. *European Journal of Operational Research*, 243(1), 323-332. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.11.035>
- Kovács, G., y Spens, K. M. (2007). Humanitarian logistics in disaster relief operations. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 37(2), 99-114. <https://doi.org/10.1108/09600030710734820>
- Lamos, H., Aguilar, K., y Acosta, R. J. (2019). OR/MS research perspectives in disaster operations management: A literature review. *Revista Facultad de Ingeniería*, 91, 43-59. <https://doi.org/10.17533/udea.redin.n91a05>
- Lamos, H., Aguilar, K., Martínez, D., Barrera, A., y Hernández, A. (2018). An ABC algorithm for solving the post-disaster resources distribution problem, a case study. *Boletín de Estadística e Investigación Operativa*, 34(2).
- Lettieri, E., Masella, C., y Radaelli, G. (2009). Disaster management: findings from a systematic review. *Disaster Prevention and Management*, 18(2), 117-136. <https://doi.org/10.1108/09653560910953207>
- Li, X., Zhao, Z., Zhu, X., y Wyatt, T. (2011). Covering models and optimization techniques for emergency response facility location and planning: A review. *Mathematical Methods of Operations Research*, 74(3), 281-310. <https://doi.org/10.1007/s00186-011-0363-4>
- Loree, N., y Aros-Vera, F. (2018). Points of distribution location and inventory management model for Post-Disaster Humanitarian Logistics. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 116, 1-24. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2018.05.003>
- Maharjan, R., y Hanaoka, S. (2020). A credibility-based multi-objective temporary logistics hub location-allocation model for relief supply and distribution under uncertainty. *Socio-Economic Planning Sciences*, 70. <https://doi.org/10.1016/j.seps.2019.07.003>
- McCoy, J. H., y Lee, H. L. (2014). Using Fairness Models to Improve Equity in Health Delivery Fleet Management. *Production and Operations Management*, 23(6), 965-977. <https://doi.org/10.1111/poms.12101>
- Mishra, D., Kumar, S., y Hassini, E. (2019). Current trends in disaster management simulation modelling research. *Annals of Operations Research*, 283(1-2), 1387-1411. <https://doi.org/10.1007/s10479-018-2985-x>

- Mladenović, N., Brimberg, J., Hansen, P., y Moreno-Pérez, J. A. (2007). The p-median problem: A survey of metaheuristic approaches. *European Journal of Operational Research*, 179(3), 927-939. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2005.05.034>
- Nappi, M. M. L., Nappi, V., y Souza, J. C. (2019). Multi-criteria decision model for the selection and location of temporary shelters in disaster management. *Journal of International Humanitarian Action*, 4(1). <https://doi.org/10.1186/s41018-019-0061-z>
- Nappi, M. M. L., y Souza, J. C. (2014). Disaster management: hierarchical structuring criteria for selection and location of temporary shelters. *Natural Hazards*, 75(3), 2421-2436. <https://doi.org/10.1007/s11069-014-1437-4>
- Ocha, U. N. O. for the C. of H. A. (2020). *Desastres Naturales en América Latina y el Caribe 2000-2019*. http://www.sld.cu/galerias/pdf/sitios/urgencia/10desastres_naturales.pdf
- Overstreet, R. E., Hall, D., Hanna, J. B., y Rainer, R. K. (2011). Research in humanitarian logistics. *Journal of Humanitarian Logistics and Supply Chain Management*, 1(2), 114-131. <https://doi.org/10.1108/20426741111158421>
- Özdamar, L., y Ertem, M. A. (2015). Models, solutions and enabling technologies in humanitarian logistics. *European Journal of Operational Research*, 244(1), 55-65. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.11.030>
- Paul, J. A., y MacDonald, L. (2016). Optimal location, capacity and timing of stockpiles for improved hurricane preparedness. *International Journal of Production Economics*, 174, 11-28. <https://doi.org/10.1016/J.IJPE.2016.01.006>
- Pouraliakbari-Mamaghani, M., Mohammadi, M., y Mirzazadeh, A. (2018). A multi-objective location-allocation model in mass casualty events response. *Journal of Modelling in Management*, 13(1), 236-274. <https://doi.org/10.1108/JM2-02-2017-0018>
- Pradhananga, R., Mutlu, F., Pokharel, S., Holguín-Veras, J., y Seth, D. (2016). An integrated resource allocation and distribution model for pre-disaster planning. *Computers & Industrial Engineering*, 91, 229-238. <https://doi.org/10.1016/J.CIE.2015.11.010>
- Rezaei-Malek, M., Tavakkoli-Moghaddam, R., Zahiri, B., y Bozorgi-Amiri, A. (2016). An interactive approach for designing a robust disaster relief logistics network with perishable commodities. *Computers & Industrial Engineering*, 94, 201-215. <https://doi.org/10.1016/J.CIE.2016.01.014>
- Rozo, D. (n.d.). *Desastres naturales en Colombia*. <https://www.arcgis.com/apps/MapTour/index.html?appid=4f811859b56f492d94cb879d43b853da>

- Salman, F. S., y Gül, S. (2014). Deployment of field hospitals in mass casualty incidents. *Computers & Industrial Engineering*, 74, 37-51. <https://doi.org/10.1016/J.CIE.2014.04.020>
- Secretaría de Planeación, y Gidrot, G. de investigación sobre desarrollo regional y ordenamiento territorial. (2011). *Santander 2030. Diagnóstico dimensión biofísico ambiental territorial de Santander*. 1-250.
- Trivedi, A., y Singh, A. (2018). Facility location in humanitarian relief: A review. *International Journal of Emergency Management*, 14(3), 213-232. <https://doi.org/10.1504/IJEM.2018.094235>
- UNGRD, U. N. para la G. del R. de D. (2019). *Consolidado reporte de emergencias 1998-2019*. <https://repositorio.gestiondelriesgo.gov.co/handle/20.500.11762/20782>
- Zhang, J. H., Li, J., y Liu, Z. P. (2012). Multiple-resource and multiple-depot emergency response problem considering secondary disasters. *Expert Systems with Applications*, 39(12), 11066-11071. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2012.03.016>
- Zhao, X., Coates, G., y Xu, W. (2019). A hierarchical mathematical model of the earthquake shelter location-allocation problem solved using an interleaved MPSO-GA. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 10(1), 1712-1737. <https://doi.org/10.1080/19475705.2019.1609605>

Percepción de los estudiantes frente a las TIC, TAC y TEP para la enseñanza de Ciencias Sociales

Gustavo Adolfo Díaz Contreras

*Departamento de Humanidades, grupo de Investigación Desarrollo Humano,
Universidad Santo Tomás, Bucaramanga, Colombia,
Correo electrónico: gustavo.diaz@ustabuca.edu.co*

Yudy Natalia Flórez Ordóñez

*Grupo de Investigación UNITEL, Universidad Santo Tomás, Bucaramanga, Colombia,
Correo electrónico: yudy.florez@ustabuca.edu.co*

Tatiana Inés Navas Gómez

*Grupo Interdisciplinario de Investigación Educativa - ESPIRAL,
Universidad Santo Tomás, Bucaramanga, Colombia,
Correo electrónico: direccionustavirtual@ustabuca.edu.co*

Introducción

Es importante establecer un claro panorama conceptual y una delimitación de las nociones TIC, TAC y TEP que nos permita entender la importancia del tema en el contexto educativo actual. En primera instancia, como cita Belloch (2018), las Tecnologías de la Información y la Comunicación (TIC) son las tecnologías que permiten el acceso, producción, tratamiento y comunicación de información. Estas tecnologías permiten hacer la recepción, el almacenamiento, tratamiento y posterior transmisión; otras características propias se encuentran la inmaterialidad, la interactividad, la interconexión, la instantaneidad, la digitalización, entre otras (Cabero, 1998).

Ahora bien, la aparición de conceptos como Tecnologías de Aprendizaje y Conocimiento (TAC) se debe en gran medida a la manera en que las TIC establecen como su centro el artefacto tecnológico y no al estudiante y los aprendizajes esperados para él. Según Lozano (2011), es en el entorno educativo donde aparece la idea de las TAC, tratando de orientar el uso de las TIC a procesos formativos, tanto para el estudiante como para el profesor. Básicamente, se propone la incidencia en los métodos de enseñanza y en el uso de la tecnología, yendo más allá de la simple herramienta informática. En otros términos, es cambiar la noción de aprendizaje de la tecnología por aprendizaje con la tecnología.

Las TAC proponen que lo importante en el proceso sean las estrategias y metodologías que el docente aplique a través del uso de la tecnología para alcanzar las competencias previstas y que estas creen nuevos ambientes de comunicación que faciliten el aprendizaje, de manera que el estudiante las utilice como instrumentos para la formación y el conocimiento (Cabero, 2015) y que, en ese sentido, la integración de tecnología aporte al pensamiento crítico y al desarrollo curricular (Coombs, 2004).

Por otro lado, las Tecnologías para el Empoderamiento y la Participación (TEP), se pueden entender como aquellas tecnologías que pueden ser aplicadas para fomentar la participación y vinculación de ciudadanos en diferentes temas de índole social, cultural, político, para efectos de concientización de su posición en la sociedad (Granados et al., 2014).

Desde la posición de las TEP, la tecnología desempeña el papel de mediadora en la construcción del conocimiento y la interacción social (Cabero, 2015), de ahí que las TEP posibiliten y proyecten la integración de las tecnologías en la sociedad para el fomento de la democracia o, como cita de forma particular Dolors Reig, la “ciber-democracia” (2012). Al permitir la teleparticipación, estas herramientas (TEP) propician la transparencia en los procesos políticos, implicando activamente a los ciudadanos y mejorando la calidad de la formación de opinión, lo cual estaría relacionado con la creación de espacios de información y deliberación (Christin y Trechsel, 2002).

Respecto al impacto de las TIC en los aprendizajes de los estudiantes, Claro (2010) plantea la importancia de considerar tres dimensiones al momento de estudiar el tema: una primera referida a la relación entre el tipo de uso de la tecnología y los resultados de aprendizaje en asignaturas, una segunda que trata acerca de las condiciones escolares y pedagógicas en que se usan las TIC y una tercera dimensión referida al papel que juegan las características sociales (capital cultural, capital social y capital económico) e individuales (género, capacidad cognitiva y actitudes) del estudiante en su apropiación y uso de las tecnologías.

La autora afirma que, si bien se encuentran resultados positivos que están normalmente asociados a usos particulares de la tecnología que facilitan el aprendizaje de conceptos específicos, los logros en términos de mejorar el rendimiento escolar de los estudiantes son menos evidentes y el impacto de las TIC en los aprendizajes no es del todo claro (Claro, 2010). Esta observación es apoyada por el catedrático Julio Cabero (2015), quien sostiene que los efectos de las TIC en el rendimiento de los alumnos son inocuos o desconocidos y que estas no siempre están sirviendo para transformar la práctica educativa.

Igualmente, otras investigaciones han encontrado que altos niveles de presencia y uso de las TIC no han repercutido en el aumento de los niveles de aprendizaje de los estudiantes (Law, Pelgrum y Plomp, 2006; European Commission, 2008; Barrera-Osorio y Linden, 2009), que los alumnos no son tan competentes tecnológicamente como se espera (Boyd, 2014), y menos aun cuando las comparaciones se realizan entre docentes y estudiantes (Waycot et al., 2010; Romero y Minelli, 2011).

Así las cosas, las TAC y TEP se presentan como estrategias que cambian el enfoque inicial dado a la tecnología por uno más ajustado a las verdaderas necesidades educativas del estudiante. A partir de este panorama, nuestra propuesta se enfoca en el provecho que pueden generar dichas estrategias para la enseñanza de las ciencias sociales. Si bien se argumentan propuestas desde perspectivas sociales y tecnológicas, lo fundamental, para efectos de esta propuesta, es el impacto que la implemen-

tación de tecnología educativa puede realizar en los espacios académicos de la Universidad Santo Tomás y sus propósitos misionales en cuanto a la formación integral.

Lo anterior lo mencionamos, porque como se puede observar en el Plan Integral Multicampus (2016 - 2027) de la Universidad Santo Tomás, la formación en humanidades se encuentra en un campo estratégico de su estructura. Esto indica que el componente humanista, fundado en el humanismo cristiano de Santo Tomás de Aquino, es vital en todo el proceso de formación profesional de sus educandos, motivo por el cual todos los programas académicos, tanto de pregrado como de posgrado, son transversalizados por las asignaturas de humanidades.

La formación profesional demanda una mirada integral, múltiple, diversa y compleja para hacerle frente a los variados asuntos que se evidencian en la cotidianidad humana y profesional; los estudiantes universitarios, al ser indagados por el nivel y responsabilidad de su formación ciudadana, son conscientes de las carencias.(...) El ser humano por su complejidad y la educación por su trascendencia, necesitan pensarse y abordarse desde enfoques sistémicos y holísticos desde núcleos integradores y diversas miradas para responder a las necesidades socioculturales que demanda la cambiante realidad. Ya no es suficiente una mirada única desde un enfoque antropológico, sociológico, epistemológico, jurídico, psicológico o espiritual; se necesitan miradas integradoras y respetuosas, intervenciones solidarias que busquen sumar y multiplicar los diferentes enfoques y soluciones que la sociedad reclama (Bonilla, Cardona y Rodríguez, 2015, pp. 74-75).

La formación en humanidades tiene la capacidad de poner en diálogo directo las diferentes experiencias interculturales, cuestiones de género y de origen étnico, pero ¿cómo transmitirlo en un siglo netamente digital? Para esto es necesario las TIC, TAC y TEP como una estrategia pedagógica acorde al contexto actual de los estudiantes, con contenidos que se estructuren pensando en la proyección de vida de los jóvenes y en los distintos fenómenos de la sociedad.

El uso de las nuevas tecnologías en las aulas virtuales de humanidades es clave para impartir la enseñanza de forma colaborativa y conseguir desarrollar en los estudiantes una correcta actitud crítica frente al contexto actual, de manera que, tal como lo señalan Rodrigo-Cano, de-Casas-Moreno y Aguaded (2018), en momentos de humanidades digitales, el docente procure empoderar a los alumnos universitarios con el fin de que estos adquieran capacidades como introducir discursos críticos.

Las nuevas tecnologías pueden fomentar una educación participativa y activa, y una educación con estas características es, en palabras de Martha Nussbaum (2010), esencial para mejorar la capacidad de análisis de los estudiantes, lo cual es uno de los principales objetivos de las humanidades. Desde esta óptica, la apropiación de TIC, TAC y TEP en ambientes virtuales de aprendizaje puede ayudar a que los estudiantes sean más competentes para utilizar tecnologías de la información y evaluarla correctamente, desarrollen más su creatividad y sean capaces de contribuir a la sociedad (Hermosa Del Vasto, 2015).

Por tal razón, la investigación pretende conocer cómo es la percepción de los estudiantes frente a las TIC, TAC y TEP inmersas en las aulas virtuales de humanidades. Es importante mencionar que todas estas cuentan con un diseño tecno-pedagógico que da cuenta de la incorporación de las TIC, TAC, TEP. Las aulas virtuales hoy en día, son un instrumento pedagógico valioso para la transmisión vital que tiene por fundamento la formación integral. Asimismo, si se observa con detenimiento, las aulas virtuales de humanidades ayudan a potenciar las temáticas expuestas líneas atrás, gracias a la interactividad y la multifuncionalidad de estas. Además, son el canal para la transmisión de una educación sin fronteras, que sea coherente con lo que rezan las ciencias humanas, por ello se necesita evaluar su percepción y pertinencia, con el fin de conocer cómo las TIC funcionan como una estrategia pedagógica que aporta a la comprensión del mundo.

Teniendo en cuenta que el impacto de cualquier tecnología está ligado a cómo se use, en qué contexto y para qué fines, debido a que abre

posibilidades como también nuevas exigencias (Bebell, 2005), el éxito de la intervención dependerá de varios factores, como lo son el tener en cuenta los perfiles e idiosincrasia de la comunidad (docentes y estudiantes), la correcta planificación del uso de las herramientas tecnológicas para convertirse en un apoyo efectivo del proceso de formación y la motivación, por el papel que esta desempeña al momento de realizar intervenciones pedagógicas efectivas.

El objetivo principal de la presente investigación consiste en evaluar la percepción de los estudiantes frente a las TIC, TAC y TEP en las aulas virtuales de espacios académicos de Filosofía Institucional y Humanismo Sociedad y Ética del Departamento de Humanidades de la Universidad Santo Tomás desde la perspectiva del estudiante para conocer su percepción. Se han revisado en la literatura diversos modelos que han sido empleados para medir la aceptación y percepción del uso de tecnologías en ambientes virtuales (Chalela et al, 2014; Abbad y Albarghouthi, 2011; Abdullah et al., 2017; M. & S., 2014; C., B., y L., 2016).

En el marco de la presente investigación se plantea el Modelo ITEAVI (Flórez, Navas y Díaz, 2019). El Modelo permite evaluar la incorporación de TIC, TAC y TEP en ambientes virtuales a partir de la medición y análisis de indicadores de percepción y participación de los estudiantes y cómo estos indicadores se comportan de acuerdo con variables influyentes. ITEAVI se basa en modelos previos como de aceptación de tecnología como el TAM1, TAM2, TAM3 y la teoría unificada de aceptación y uso de tecnología (UTAUT) los cuales fueron diseñados con el propósito de establecer la aceptación de la tecnología en los usuarios, pero de manera previa a que esta sea puesta en marcha (González, 2018). Por el contrario, el modelo aquí desarrollado incluyó variables propias definidas a partir de las TEC en los ambientes virtuales de aprendizaje (Flórez, Navas y Díaz, 2019), figura 67.

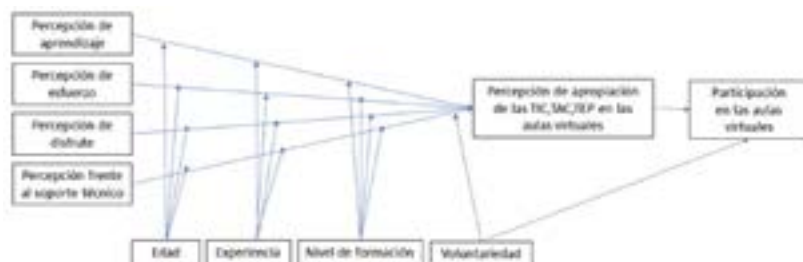
Metodología

Teniendo en cuenta que las condiciones base para el desarrollo de la presente investigación se caracterizan por ser definidas y detalladas, orientadas a un grupo específico, que en general se orientan hacia una

investigación aplicada y que los diseños que mejor se ajustan a la investigación aplicada son los cuasi-experimentales (Cabré, 2012), se determina la metodología cuasi experimental como la base de la construcción de la investigación, atendiendo a la definición de (Arnau, 1995) en la que cita: “Aquellos sistemas de investigación donde el criterio de asignación de los sujetos o unidades a las condiciones de tratamiento o condiciones de estudio no se rige por las leyes del azar” (p. 15).

En la metodología cuasi experimental se presentan principalmente dos tipos de estrategias en la recolección de datos, las cuales son definitorias en el desarrollo del proyecto. Según (Cabré, 2012): La primera corresponde a la estrategia transversal o entre-sujetos, basada en la comparación de grupos no equivalentes. La segunda estrategia, la longitudinal, consiste en llevar a cabo comparaciones de tipo intra-sujeto, es decir, registrar la misma respuesta a lo largo de una serie de puntos en el tiempo.

A partir de esta definición se elige la metodología cuasi experimental con estrategia longitudinal donde variables y los indicadores del modelo ITEAVI fueron medidos en una muestra de 60 estudiantes de pregrado y 20 estudiantes de posgrado en los espacios de Filosofía Institucional y Humanismo Sociedad y Ética, respectivamente. A cada uno de los estudiantes se le aplicó un cuestionario compuesto por 21 preguntas (Flórez, Navas y Díaz, 2019). La escala de medida que se utilizó es la escala de Likert de seis opciones: 1. Totalmente en desacuerdo, 2. En desacuerdo, 3. Ni de acuerdo ni en desacuerdo, 4. De acuerdo, 5. Totalmente de acuerdo y 6. No conozco o no he participado. Flórez, Navas y Díaz mencionan que las variables fundamentales del modelo son: percepción de aprendizaje (PA), percepción de esfuerzo (PE), percepción de disfrute (PD) y percepción frente al soporte técnico (PS); estas cuatro variables son influenciadas directamente por las variables: Experiencia (E), edad (E), nivel de formación (NF), área de conocimiento (AC) y voluntariedad (V). La percepción de los estudiantes frente a la incorporación de TIC, TAC y TEP en ambientes virtuales repercutirá en la participación que los estudiantes tengan en las aulas virtuales, no obstante, esta participación también estará influenciada por la variable de voluntariedad (2019, Párr. 11).

Figura 67. *Modelo ITEAVI*

Fuente: Flórez, Navas y Díaz (2019).

A partir de estos indicadores se obtuvieron los resultados que se presentarán a continuación. En la tabla 18 se muestra un comparativo de los resultados obtenidos en los indicadores generales de percepción entre los estudiantes de pregrado y los estudiantes de posgrado, teniendo en cuenta que hay diferencias de edades y de intereses.

En la tabla 19 se presentan los resultados del disfrute en los estudiantes de posgrado y en la tabla 20 el disfrute en estudiantes de pregrado. La percepción de disfrute es definida como grado de percepción de los estudiantes frente al disfrute de las TIC, TAC y TEP, incorporadas en las aulas virtuales. Se analizó la percepción de disfrute frente al desarrollo de las actividades y la percepción de disfrute frente al uso de los recursos. A continuación en la tabla 20 se presentan los resultados descriptivos. En la tabla las columnas de desacuerdo y totalmente en desacuerdo, no se presentan, debido a que no registraron respuestas, respuestas con cero por ciento (0%) se registraron con un guión.

La percepción frente al soporte técnico es definida como grado de percepción de los estudiante frente al apoyo brindado por el soporte técnico en el aula virtual que incorporan TIC, TAC y TEP. Se analizó la percepción frente al soporte técnico brindado de forma síncrona y asíncrona. A continuación en la tabla 21 se presentan los resultados descriptivos. En la tabla las columnas de desacuerdo y totalmente en desacuerdo, no se presentan debido a que no registraron respuestas; respuestas con cero por ciento (0%) se registraron con un guión.

Tabla 18. *Comparativo de pregrado y posgrado*

Categoría	Indicador	Pregrado	Posgrado
Percepción de aprendizaje (PA)	PA1. Percepción de aprendizaje	79%	92%
Percepción de esfuerzo (PE)	PE1. Percepción de esfuerzo frente al desarrollo de actividades	75%	85%
	PE2. Percepción de esfuerzo frente al uso de los recursos	77%	80%
Percepción de disfrute (PD)	PD1. Percepción de disfrute frente al desarrollo de las actividades	69%	50%
	PD2. Percepción de disfrute frente al uso de los recursos	78%	100%
Percepción frente soporte técnico (PS)	CF1. Percepción frente al soporte técnico brindado de forma síncrona	68%	90%
	CF2. Percepción frente al soporte técnico brindado de forma asíncrona	69%	95%
Indicador de percepción global		74%	85%

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 19. *Percepción de disfrute posgrado*

Variable de percepción	Ni de acuerdo ni en desacuerdo	De acuerdo	Totalmente de acuerdo	No ha utilizado recursos o participado en los foros
Percepción de disfrute frente al desarrollo de las actividades				
Me agrada participar en los foros del aula virtual.	40%(4)	20%(2)	20%(2)	20%(2)
Me agrada realizar las actividades del aula virtual.	40%(4)	50%(5)	10%(1)	-
Percepción de disfrute frente al uso de los recursos				
Me gusta utilizar los recursos dispuestos en el aula.		80%(8)	20%(2)	-

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 20. Percepción de disfrute pregrado

Variable de percepción	Totalmente en desacuerdo	En desacuerdo	Ni de acuerdo ni en desacuerdo	De acuerdo	Totalmente de acuerdo	No ha utilizado recursos o participado en los foros
Percepción de disfrute frente al desarrollo de las actividades						
Me agrada participar en los foros del aula virtual.	6,7%(4)	1,7%(1)	23,3%(14)	36,7%(22)	31,7%(19)	0%(0)
Me agrada realizar las actividades del aula virtual.	5%(3)	5%(3)	20%(12)	38,3%(23)	31,7%(19)	0%(0)
Percepción de disfrute frente al uso de los recursos						
Me gusta utilizar los recursos dispuestos en el aula.	5%(3)	0%(0)	9%(15)	50%(30)	28,3%(11)	1%(1,7)

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 21. Percepción frente al soporte técnico posgrado

Variable de percepción	Ni de acuerdo ni en desacuerdo	De acuerdo	Totalmente de acuerdo	No he utilizado el servicio técnico
Percepción frente al soporte técnico brindado de forma síncrona.				
El soporte técnico recibido de manera síncrona (teléfono, chat en línea, asesoría presencial) para el acceso a los recursos del aula virtual fue apropiado.	-	70%(7)	20%(2)	10%(1)
El soporte técnico recibido de manera síncrona (teléfono, chat en línea, asesoría presencial) para el desarrollo de las actividades del aula virtual fue apropiado	10%(1)	70%(7)	20%(2)	-
Percepción frente al soporte técnico brindado de forma asíncrona				
El soporte técnico recibido de manera asíncrona (correo electrónico, ticket, tutoriales) para el desarrollo de las actividades del aula virtual fue apropiado.	-	90%(79)	10%(1)	-
El soporte técnico recibido de manera asíncrona (correo electrónico, ticket, tutoriales) para el desarrollo de las actividades del aula virtual fue apropiad	10%(1)	80%(8)	10%(1)	-

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 22. *Percepción frente al soporte técnico pregrado*

Variable de percepción	Totalmente en desacuerdo	En desacuerdo	Ni de acuerdo ni en desacuerdo	De acuerdo	Totalmente de acuerdo	No he utilizado el servicio técnico
Percepción frente al soporte técnico brindado de forma síncrona						
El soporte técnico recibido de manera síncrona (teléfono, chat en línea, asesoría presencial) para el acceso a los recursos del aula virtual fue apropiado.	3,3%(2)	6,7%(4)	13,3%(8)	43,3%(26)	25%(15)	8,3%(5)
El soporte técnico recibido de manera síncrona (teléfono, chat en línea, asesoría presencial) para el desarrollo de las actividades del aula virtual fue apropiado.	3,3%(2)	0%(0)	20%(12)	38,3%(23)	30%(18)	8,3%(5)
CF2. Percepción frente al soporte técnico brindado de forma asíncrona						
El soporte técnico recibido de manera asíncrona (correo electrónico, ticket, tutoriales) para el desarrollo de las actividades del aula virtual fue apropiado.	1,7%(1)	10%(6)	11,7%(7)	41,7%(25)	26,7%(18)	8,3%(5)
El soporte técnico recibido de manera asíncrona (correo electrónico, ticket, tutoriales) para el desarrollo de las actividades del aula virtual fue apropiado.	1,7%(1)	3,3%(2)	16,7%(10)	43,3%(26)	26,7%(16)	8,3%(5)

Fuente: Elaboración propia.

La percepción de aprendizaje es definida como el grado de creencia de los estudiantes sobre si las TIC, TAC y TEP incorporadas en las aulas virtuales le aportan en su aprendizaje. A continuación en las tablas 23 y 24 se presentan los resultados descriptivos para posgrado y pregrado, según las preguntas definidas en el instrumento. Para el caso de posgrado, en la tabla, las columnas de desacuerdo y totalmente en desacuerdo, no se presentan debido a que no registraron respuestas, respuestas con cero por ciento (0%) se registraron con un guión. Para ambos casos, se evidencian unos altos resultados que se pueden definir como un balance positivo en temas de percepción de aprendizaje y una buena señal para el uso de estas herramientas en ambientes como el usado para la muestra.

De los aspectos evaluados, el último que mencionaremos tiene que ver con la percepción de esfuerzo. La percepción de esfuerzo es definida como el grado de utilización sin esfuerzo que un estudiante percibe de las TIC, TAC y TEP en las aulas virtuales. Se analizó la percepción de esfuerzo frente al desarrollo de actividades y la percepción de esfuerzo frente al uso de los recursos. A continuación, en las tablas 25 y 26 se presentan los resultados descriptivos. Nuevamente, para el caso de posgrados, en la tabla la columna de totalmente en desacuerdo, no se presentó debido a que no registraron respuestas. Respuestas con cero por ciento (0%) se registraron con un guion.

Para el caso del presente estudio hubo dos variables que se consideran influyentes en los resultados, la primera de ellas tiene que ver con la edad de las personas que la usaron y la segunda está relacionada con las experiencias previas con aulas virtuales en los que se hiciera uso de las TIC. La muestra de posgrado fue segmentada en dos grupos: de 21 a 30 años (7 estudiantes) y 31 a 40 años (3 estudiantes). Y en pregrado en tres grupos: de 15 a 18 años (32 estudiantes), de 19 a 22 años (20 estudiantes) y más de 23 años (8 estudiantes). A continuación, en las tablas 27 y 28 se presenta la distribución por edad. Para facilitar el análisis se ha promediado para tener un resultado global, el cual es presentado en las figuras 68 y 69.

Tabla 23. Percepción de aprendizaje posgrado

Variable de percepción	Ni de acuerdo ni en desacuerdo	De acuerdo	Totalmente de acuerdo	No ha visto los videos, o no ha participado en los foros, o no conoce
Los videos de cada una de las secciones permite ampliar lo visto por el profesor en el aula de aprendizaje.	-	50%(5)	50%(5)	-
Los videos de cada una de las secciones facilitan el aprendizaje en el espacio academico.	-	90%(9)	10%(1)	-
Los foros de cada una de las secciones permite ampliar lo visto por el profesor en el aula de aprendizaje.	10%(1)	70%(7)	10%(1)	10%(1)
Los foros de cada una de las secciones facilitan el aprendizaje en el espacio academico.	20%(2)	50%(5)	20%(2)	10%(1)
Las actividades de cada una de las secciones permite ampliar lo visto por el profesor en el aula de aprendizaje.	10%(1)	70%(7)	20%(2)	-
Las actividades de cada una de las secciones facilitan el aprendizaje en el espacio academico.	-	50%(5)	50%(5)	-
El symboloo facilita el aprendizaje en el espacio academico.	-	60%(6)	40%(4)	-
La caja de herramienta facilitan el aprendizaje en el espacio academico.	-	80%(8)	20%(2)	-

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 24. *Percepción de aprendizaje pregrado*

Variable de percepción	Totalmente en desacuerdo	En desacuerdo	Ni de acuerdo ni en desacuerdo	De acuerdo	Totalmente de acuerdo	No ha visto los videos, o no ha participado en los foros, o no conoce
Los videos de cada una de las secciones permiten ampliar lo visto por el profesor en el aula de aprendizaje.	5% (3)	1,7%(1)	5 %(3)	43,3%(26)	38,3%(23)	6,7%(4)
Los videos de cada una de las secciones facilitan el aprendizaje en el espacio académico.	3,3(2)	3,3%(2)	8,3%(5)	43,3%(26)	36,7%(22)	5,0%(3)
Los foros de cada una de las secciones permite ampliar lo visto por el profesor en el aula de aprendizaje.	3,3(2)	3,3%(2)	11,7%(7)	53,3%(32)	28,3%(17)	0%(0)
Los foros de cada una de las secciones facilitan el aprendizaje en el espacio académico.	3,3(2)	1,7%(1)	13,3%(8)	55%(33)	26,7%(15)	0%(0)
Las actividades de cada una de las secciones permite ampliar lo visto por el profesor en el aula de aprendizaje.	1,7%(1)	1,7%(1)	13,3%(8)	50%(30)	33,3%(20)	0%(0)
Las actividades de cada una de las secciones facilitan el aprendizaje en el espacio académico.	1,7%(1)	1,7%(1)	11,7%(7)	50%(30)	31,7%(19)	2%(3,3)
El symboloo facilita el aprendizaje en el espacio académico.	3,3%(2)	1,7%(1)	13,3%(8)	41,7%(25)	31,3%(20)	6,7%(4)
La caja de herramienta facilita el aprendizaje en el espacio académico.	1,7%(1)	1,7%(1)	13,3%(8)	43,3%(26)	26,7%(16)	11,7%(7)

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 25. *Percepción de esfuerzo posgrado*

Variable de percepción	En desacuerdo	Ni de acuerdo ni en desacuerdo	De acuerdo	Totalmente de acuerdo	No ha realizado actividades, visto videos o participado en los foros
Percepción de esfuerzo frente al desarrollo de actividades					
El tiempo asignado a las actividades le permitió realizarlas sin mayor esfuerzo.	-	20%(2)	70%(7)	10%(1)	-
Las indicaciones para el desarrollo de las actividades me permitieron realizarlas sin mayor esfuerzo.	-	10%(1)	860%(8)	10%(1)	-
Percepción de esfuerzo frente al uso de los recursos					
Pudo visualizar los videos dispuestos en el aula sin mayor esfuerzo.	10%(1)	60%(6)	30%(3)	-	-
Participó en los foros en el aula sin realizar un mayor esfuerzo.	30%(3)	-	50%(5)	-	20%(2)
Utilizó el symboloo dispuesto en el aula sin realizar un mayor esfuerzo.	10%(1)	-	70%(7)	20%(2)	-
Pudo acceder a la caja de herramienta sin realizar un mayor esfuerzo.	-	10%(1)	60%(6)	20%(2)	-

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 26. *Percepción de esfuerzo pregrado*

Variable de percepción	Totalmente en desacuerdo	En desacuerdo	Ni de acuerdo ni en desacuerdo	De acuerdo	Totalmente de acuerdo	No han realizado actividades, visto videos o participado en los foros
Percepción de esfuerzo frente al desarrollo de actividades						
El tiempo asignado a las actividades le permitió realizarlas sin mayor esfuerzo.	5,0%(3)	1,7%(1)	18,3%(11)	43,3%(26)	31,7%(19)	0%(0)
Las indicaciones para el desarrollo de las actividades me permitieron realizarlas sin mayor esfuerzo.	3,3%(2)	5,0%(3)	15%(9)	51,7%(25)	25%(15)	0%(0)
Percepción de esfuerzo frente al uso de los recursos						
Pudo visualizar los videos dispuestos en el aula sin mayor esfuerzo.	1,7%(1)	1,7%(1)	5%(3)	45%(27)	35%(21)	1,7%(1)
Participó en los foros en el aula sin realizar un mayor esfuerzo.	3,3%(2)	3,3%(2)	8,3%(5)	58,3%(35)	25%(15)	1,7%(1)
Utilizó el symboloo dispuesto en el aula sin realizar un mayor esfuerzo.	3,3%(2)	3,3%(2)	13,3%(8)	43,3%(26)	28,3%(17)	8,3%(5)
Pudo acceder a la caja de herramientas sin realizar un mayor esfuerzo.	0%(0)	3,3%(2)	10%(6)	48,3%(29)	26,7%(16)	11,7%(7)

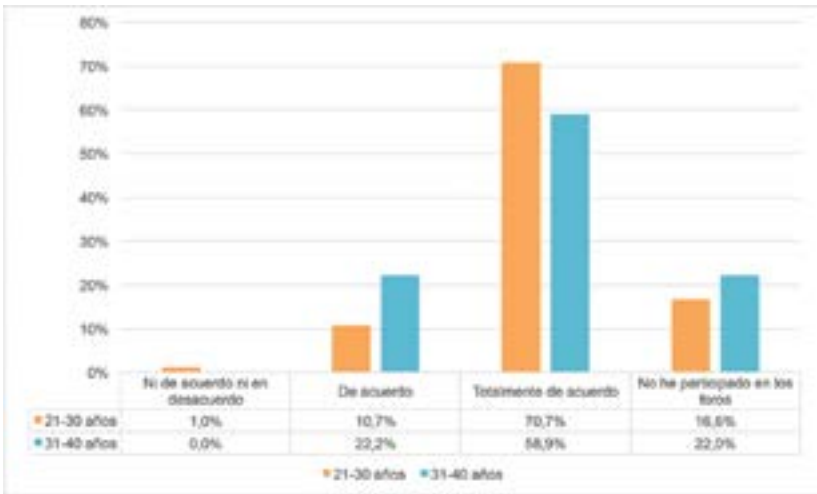
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 27. *Distribución por edad y género posgrado*

Género	Edad		Total
	21 - 30 años	31 - 40 años	
Hombre	6	3	9
Mujer	1	0	1
Total	7	3	10

Fuente: Elaboración propia.

Figura 68. *Percepción global de indicadores por edad posgrado*

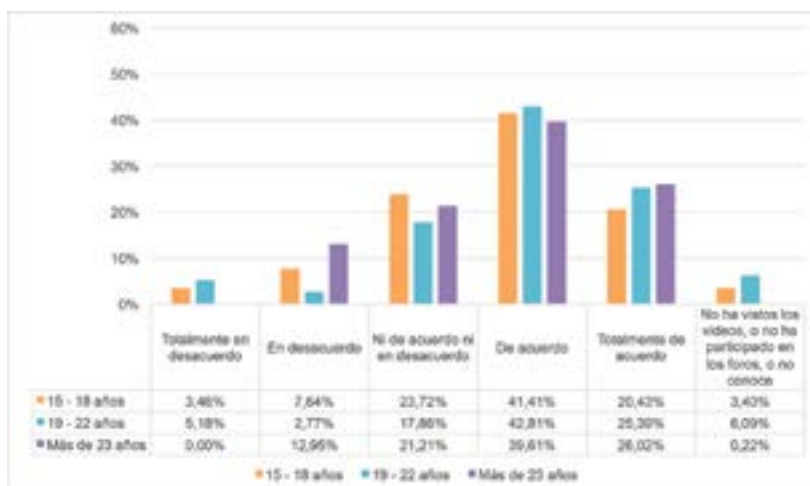


Fuente: Elaboración propia.

Tabla 28. *Distribución por edad y género pregrado*

Género	Edad			Total
	15 - 18 años	19 - 22 años	Más de 23 años	
Hombre	19	11	3	33
Mujer	13	9	5	27
Total	32	20	8	60

Fuente: Elaboración propia.

Figura 69. *Percepción global de indicadores por edad pregrado*

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, presentamos los resultados obtenidos a partir de la variable de la experiencia. La influencia de la experiencia es analizada a partir de la participación previa en algún curso por internet en el que se haya hecho uso de aulas virtuales. En las tablas 29 y 30 se presentan los resultados descriptivos de posgrado y en las tablas 31 y 32 se presentan los resultados de pregrado.

Tabla 29. *Porcentaje de estudiantes de posgrado por edades que han estudiado con aulas virtuales*

		21 - 30 años	31 - 40 años	Total
SÍ	Recuento	7	2	9
	% dentro de edad	70%	20%	90%
NO	Recuento	0	1	1
	% dentro de edad	0%	10,0%	10%

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 30. *Porcentaje de estudiantes de posgrado por edades que han realizado cursos por internet*

		21 - 30 años	31 - 40 años	Total
SÍ	Recuento	6	3	9
	% dentro de edad	60%	30%	90%
NO	Recuento	1	0	1
	% dentro de edad	10%	0%	10%

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 31. *Porcentaje de estudiantes de pregrado por edades que han estudiado con aulas virtuales*

		15 - 18 años	19 - 22 años	Más de 23 años	Total
Este curso es la primera vez	Recuento	4	4	2	10
	% dentro de edad	12,5%	20,0%	25,0%	16,7%
SÍ	Recuento	15	14	4	33
	% dentro de edad	46,9%	70,0%	50,0%	55,0%
NO	Recuento	13	2	2	17
	% dentro de edad	40,6%	10,0%	25,0%	28,3%

Fuente: Elaboración propia

Tabla 32. *Porcentaje de estudiantes de pregrado por edades que han realizado cursos por internet*

		15 - 18 años	19 - 22 años	Más de 23 años	Total
SÍ	Recuento	12	6	5	23
	% dentro de edad	37,5%	30,0%	62,5%	38,3%
NO	Recuento	20	14	3	37
	% dentro de edad	62,5%	70,0%	37,5%	61,7%

Fuente: Elaboración propia

Conclusiones

Como se mencionó, entre posgrado y pregrado hay diferencias en edades que pueden llevar a que la percepción en cuanto al disfrute de las actividades sea menor, ya que hay, también, menor predisposición frente al uso de herramientas virtuales.

El indicador más bajo en los dos grupos corresponde, precisamente, a la precepción de disfrute. En el caso de pregrado es del 69%, mientras en posgrado baja al 50%. Estos indicadores se pueden entender como que las actividades deben ajustarse con el fin de conseguir un mayor porcentaje en este ítem, ya que los resultados en cuanto a la percepción de aprendizaje son considerablemente buenos, por lo que los estudiantes, tanto en pregrado como en posgrado, ven útil el uso de las herramientas.

Ahora bien, en este mismo ítem, en el criterio de disfrute frente a los recursos hay un porcentaje de disfrute mucho más alto, por lo que se puede pensar que actividades como el foro o los videos, al contar con un menor grado de participación, lleva a los estudiantes a elegir la opción “No sabe, no responde” (40% de los estudiantes de posgrado y 23% de pregrado eligieron esta opción) lo que disminuye la percepción de disfrute en aspectos individuales, pero mantiene un buen porcentaje en términos generales.

A diferencia de esto, la percepción de aprendizaje es de 79% en pregrado y 92% en posgrado, por lo que, en ambos casos, se puede concluir que las TIC, TAC y TEP tienen una repercusión positiva en cuanto a la percepción de aprendizaje de los estudiantes. Si se hacen ajustes que lleven al aumento en el disfrute de las actividades y promover más la participación en algunas actividades, puede generar mejores resultados en temas de percepción de aprendizaje, sobre todo en estudiantes de pregrado, quienes suelen considerar que el aprendizaje debe estar ligado al disfrute. Esta diferencia en las estadísticas podría explicarse a partir del mayor número de estudiantes en el posgrado que han realizado cursos previos en internet, 90% en posgrado y solo el 38,3% en el pregrado.

El porcentaje de aceptación en cuanto al soporte técnico es marcadamente diferente entre pregrado y posgrado (CF1 68%, 90% y CF2 69%, 95%, respectivamente). Aunque el porcentaje de aceptación es bueno, se deben considerar los problemas que se presentaron con más frecuencia, la manera en que se dio respuesta a ellos y los tiempos en que se resolvieron estos problemas. Lo anterior con el fin de realizar los ajustes que reduzcan la brecha entre los dos programas. La accesibilidad a las aulas virtuales tuvo un mayor número de “En desacuerdo” con 6.74% mientras que en esta misma respuesta el ítem de soporte técnico para el desarrollo de las actividades tuvo 0%. En cuanto a la respuesta “totalmente desacuerdo”, los dos ítems tuvieron un 3.3%, por lo que se considera que esta es una de las oportunidades de mejora que se deben abordar, ya que las dificultades en términos de acceso a la plataforma o de desarrollo de las actividades, pueden influir de manera directa en la percepción de disfrute que los estudiantes tienen de las actividades, ya que para cualquier persona puede ser incómodo no poder acceder con facilidad al aula o tener interrupciones en el desarrollo de las actividades.

Finalmente, en la tabla 18 como indicadores de percepción global, se evidencia un 74% en pregrado y un 85% en posgrado. Por lo que podemos afirmar que la aceptación es buena, pero se deben ajustar algunos de los elementos evaluados con el fin de llevar a que la aceptación alcance unos porcentajes de aceptación muy bueno o excelentes. Se considera realmente importante fortalecer las humanidades a partir de estas estrategias, pues el gran impacto que han tenido los medios digitales están llevando muchos de los procesos que antes eran análogos o físicos al campo de la digitalidad, por lo que, es tarea de las instituciones de educación acompañar a los estudiantes en estos procesos de actualización, acercarlos a la tecnología y usar esta, para que los aprendizajes necesarios se alcancen según los objetivos que se propongan. Si estos procesos no se realizan, se condena a los estudiantes a ser excluidos y perder accesibilidad a la información que los puede hacer mejores ciudadanos, más conscientes y críticos, así como capaces de tomar decisiones informadas donde se mitiguen los posibles riesgos.

Referencias

- Arnau, J. (1995). *Diseños longitudinales aplicados a las ciencias sociales y del comportamiento*. Limusa.
- Abbad, M. M., y Albarghouthi, M. (2011). Evaluate students' perceptions of the virtual learning environment at Paisley University. *International Journal of Emerging Technologies in Learning*, 6(3), 28-34. <https://doi.org/10.3991/ijet.v6i3.1489>
- Abdullah, H., Wahidin, I. S., Ibrahim, K., Rahman, S. A., Arshad, S. R., y Zain, S. A. M. (2017). Awareness and perception among academicians in utilizing personalised learning management system: A case study. In *Proceedings of the 29th International Business Information Management Association Conference - Education Excellence and Innovation Management through Vision 2020: From Regional Development Sustainability to Global Economic Growth* (pp. 3762-3774). <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85029764436&partnerID=40&md5=665a0e638acaff87a9be23688c7c6454>
- Badilla, M. G., Vera, A., y Lytras, M. D. (2017). Pre-service teachers' skills and perceptions about the use of virtual learning environments to improve teaching and learning. *Behaviour and Information Technology*, 36(6), 575-588. <https://doi.org/10.1080/0144929X.2016.1266388>
- Barrera-Osorio, F., y Linden, L. (2009): The use and misuse of computers in education: evidence from a randomized experiment in Colombia. *Policy Research Working Paper, 4836. Impact Evaluation Series*, núm. 29. The World Bank, Human Development Network.
- Bebell, D. (2005). Technology promoting student excellence: an investigation of the first year of 1:1 computing in New Hampshire middle schools. www.bc.edu/research/intasc/PPT/tpse12_1_04.ppt
- Belloch, C. (2018). *Las Tecnologías de la Información y Comunicación (TIC.) como recurso para la educación*.
- Benson, V., y Morgan, S. (2013). Social higher education: How effective is it? In *Proceedings of the International Conference on e-Learning, ICEL* (pp. 45-51). <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84904761411&partnerID=40&md5=96e580cc9a8419ee5a53274bd3df2e5f>
- Bonilla, G., Cardona, R., y Rodríguez, D. (2015). *Pensar la ciudadanía: condición humana y democracia*. Ediciones USTA.

- Boyd, D. (2014). *It's complicated: the social lives of networked teens*. Yale University Press.
- Cabré, R. B. (2012). Diseños cuasi-experimentales y longitudinales. En R. B. Cabré. Departamento de Metodología de las Ciencias del Comportamiento, Universidad de Barcelona.
- C., J., B., J., y L., M. del C. (2016). Technology acceptance model & realidad aumentada: estudio en desarrollo. *Revista Lasallista de Investigación*, 13, 18-26. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=69549127003>
- Cabero, J. (1998). Impacto de las nuevas tecnologías de la información y la comunicación en las organizaciones educativas. *Enfoques en la organización y dirección de instituciones educativas formales y no formales*, 1(1), 197-206. http://sistemaucem.edu.mx/bibliotecavirtual/oferta/maestria/educacion/ME205/impacto_de_las_nuevas_tecnologias_de.pdf
- Cabero, J. (2015). Reflexiones educativas sobre las tecnologías de la información y la comunicación (TIC). *Revista Tecnología, Ciencia y Educación*, 0(1). <https://tecnologia-ciencia-educacion.com/index.php/TCE/article/view/27>
- Cabero, J., y Barroso, J. (coords.) (2015). *Nuevos retos en tecnología educativa*. Síntesis.
- Cabero, J., Barroso, J., y Llorente, M. del C. (2016). Technology acceptance model & realidad aumentada: estudio en desarrollo. *Revista Lasallista de Investigación*. <https://doi.org/10.22507/rli.v13n2a2>
- Calzadilla, M. E. (2002). Aprendizaje colaborativo y tecnologías de la información y la comunicación. *Revista Iberoamericana de Educación*, 29(1), 1-10. <https://doi.org/https://doi.org/10.35362/rie2912868>
- Chalela, S., Valencia, A., Bermúdez, J. y Ortega, C. (2014). Percepciones estudiantiles acerca del uso de nuevas tecnologías en instituciones de educación superior en Medellín. *Revista Lasallista de Investigación*. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.22507/rli.v13n2a14>.
- Claro, M. (2010). *Impacto de las TIC en los aprendizajes de los estudiantes. Estado del arte*. Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). <https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/3781/lcw339.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Coombs, S. (2004). The benefits of introducing a Learning and Knowledge Technology module as part of a core curriculum for postgraduate professional development degrees. In U. ok Jonkoping (Ed.). *Scandinavian Asian Pacific Conference: The challenge of integrating ICT in teacher education*. <http://www.leeds.ac.uk/educol/documents/144103.htm>

- Chianese, A., Marulli, F., Piccialli, F., Benedusi, P., y Jung, J. E. (2017). An associative engines based approach supporting collaborative analytics in the Internet of cultural things. *Future Generation Computer Systems*, 66, 187-198. <https://doi.org/10.1016/j.future.2016.04.015>
- Christin, T., y Trechsel, A. (2002). Joining the EU? Explaining Public Opinion in Switzerland. *European Union Politics*, 3(4), 415-443. <https://doi.org/10.1177/1465116502003004002>
- Davis, F. D. (1989). Perceived Usefulness, Perceived Ease of Use, and User Acceptance of Information Technology. *MIS Quarterly*. <https://doi.org/10.2307/249008>
- De Sales, F. M., y Ramos, M. A. S. (2015). Technical and pedagogical usability in e-Learnig: Perceptions of students from the Federal Institute of Rio Grande do Norte (Brazil) in virtual learning environment [Usabilidade Técnica e Pedagógica no Ensino a Distância: A percepção de alunos do Institut. In *2015 10th Iberian Conference on Information Systems and Technologies, CISTI 2015*. <https://doi.org/10.1109/CISTI.2015.7170447>
- Dyer, R. A. D. (2014). Exploring the relevancy of Massive Open Online Courses (MOOCs): A Caribbean university approach. *Information Resources Management Journal*, 27(2), 61-77. <https://doi.org/10.4018/irmj.2014040105>
- Esteve, F. M., y Gisbert, M. (2011). El nuevo paradigma de aprendizaje y las nuevas tecnologías. *Revista de Docencia Universitaria, REDU*, 9(3), 55-73.
- European Commission. (2008). *The education and training contribution to the Lisbon strategy*. http://ec.europa.eu/education/policies/2010/et_2010_en.html [12-03-2010].
- Flórez, Navas y Díaz. (2019). Modelo ITEAVI, una propuesta para evaluar la incorporación de TIC, TAC, TEP en ambientes virtuales de aprendizaje. XXI Encuentro Internacional Virtualeduca 2019, Cuba. Ed. Editorial Feijóo.
- Granados, J., López, R., Avello, R., Luna, D., Luna, E., y Luna, W. (2014). Las tecnologías de la información y las comunicaciones, las del aprendizaje y del conocimiento y las tecnologías para el empoderamiento y la participación como instrumentos de apoyo al docente de la universidad del siglo XXI. *MediSu*, 12. <http://www.medisur.sld.cu/index.php/medisur/article/view/2751/1452>
- González-Pérez, L. I. (2018). *Instrumento aceptación tecnológica de repositorios institucionales*.
- Hermosa Del Vasto, P. (2015, julio-diciembre). Influencia de las tecnologías de información y comunicación (TIC) en el proceso enseñanza-aprendizaje:

- una mejora de las competencias digitales. *Rev. Cient. Gen.* José María Córdova 13(16), 121-132.
- Hobbs, R., y Tuzel, S. (2017). Teacher motivations for digital and media literacy: An examination of Turkish educators. *British Journal of Educational Technology*, 48(1), 7-22. <https://doi.org/10.1111/bjet.12326>
- Humanante-Ramos, P., Fernandez-Acevedo, J., y Jiménez, C. (2019). Virtual classrooms in university contexts: Perceptions of use by students [Aulas virtuales en contextos universitarios: Percepciones de uso por parte de los estudiantes]. *Espacios*, 40(2). <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85060205103&partnerID=40&md5=faf106a837d4d2fabb-0befaa0d825de4>
- Islas, C. (2017). La implicación de las TIC en la educación: alcances, limitaciones y prospectiva. *RIDE. Revista Iberoamericana para la Investigación y el Desarrollo Educativo*, 8(15), 861-876. <https://dx.doi.org/10.23913/ride.v8i15.324>
- Law, N., Pelgrum, W., y Plomp, T. (eds.) (2006). *Pedagogy and ICT use in schools around the world: findings from the IEA sites 2006 Study*. CERC-Springer.
- Lee, J.-W. (2010). Online support service quality, online learning acceptance, and student satisfaction. *Internet and Higher Education*, 13(4), 277-283. <https://doi.org/10.1016/j.iheduc.2010.08.002>
- López, R., y Omoteso, K. (2013). Perceptions of the Usefulness of Virtual Learning Environments in Accounting Education: A Comparative Evaluation of Undergraduate Accounting Students in Spain and England. *Accounting Education*, 22(5), 445-466. <https://doi.org/10.1080/09639284.2013.814476>
- Lozano, R. (2011). De las TIC a las TAC: tecnologías del aprendizaje y del conocimiento. *Anuario ThinkEPI*, (1), 45-47.
- M., A. V., y S., M. C. (2014). Modelo predictivo de la intención de adopción de Blended learning en profesores universitarios. *Universitas Psychologica*, 13, 601-614. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=64732221017>
- Nussbaum, M. (2010). *Sin fines de lucro. por qué la democracia necesita de las humanidades*. Katz Editores.
- Reig, D. (2012). Disonancia cognitiva y apropiación de las TIC. *Revista Telos*, 1.
- Rezaie, M., Nosratabadi, H. E., y Fazlollahtabar, H. (2012). Applying KANO model for users' satisfaction assessment in e-learning systems: A case study in iran virtual higher educational systems. *International Journal of Information and Communication Technology Education*, 8(3), 1-12. <https://doi.org/10.4018/jicte.2012070101>

- Rodrigo-Cano, D., de-Casas-Moreno, P., y Aguaded, I. (2018). El rol del docente universitario y su implicación ante las humanidades digitales. *index.comunicación*, 8(2), 13-31.
- Romero, M., y Minelli, J. (2011). La generación net se tambalea. Percepción del dominio de las TIC de estudiantes de magisterio. *Revista Teoría de la Educación. Educación y Cultura en la Sociedad de la Información*, 12(3), 265-283.
- Romero, M., y Corpas, A. (2019). Students' perception of Virtual Learning Environments and the development of oral communication competence. A case study [Creencias de los estudiantes en torno a los Espacios Virtuales de Aprendizaje en el desarrollo de la competencia comunicativa oral. U. *Espacios*, 40(5). <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0->
- van den Berg, P., Arentze, T., y Timmermans, H. (2013). A path analysis of social networks, *telecommunication* and social activity-travel patterns. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 26, 256-268. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2012.10.002>
- Venkatesh, V., y Davis, F. D. (2000). A Theoretical Extension of the Technology Acceptance Model: Four Longitudinal Field Studies. *Management Science*. <https://doi.org/10.1287/mnsc.46.2.186.11926>
- Venkatesh, V., Morris, M.G., y Davis, G.B. (2003). User Acceptance of Information Technology: Toward a Unified View. *MIS Quarterly*. <https://doi.org/10.2307/30036540>
- Venkatesh, V., y Bala, H. (2008). Technology acceptance model 3 and a research agenda on interventions. *Decision Sciences*. <https://doi.org/10.1111/j.1540-5915.2008.00192.x>
- Waycott, J. et al. (2010). Digital divides? Student and staff perceptions of information and communication technologies. *Computers and Education*, 54(4), 1202-1211.



UNIVERSIDAD
SANTOTOMAS
— BUCARAMANGA —

C3HIII

C8HIII