SISTEMA BASADO EN REGLAS PARA DETERMINAR EL CAMPO DE APLICACIÓN DE LA SIMULACIÓN EN EL SISTEMA DE SALUD COLOMBIANO

Autor

Laura Natalia Hernández Bernal

Director

Germán Andrés Méndez Giraldo Ph. D.

Universidad Distrital Francisco José De Caldas

Maestría en Ingeniería Industrial

Énfasis en Inteligencia Computacional para los Negocios

Bogotá, Colombia

Agosto de 2022

CONTENIDO

Resumen 7

Palabras Clave 7

Introducción 8

1. Problema de investigación 12

1.1 Antecedentes 12

1.2 Justificación 19

1.3 Formulación 22

1.4 Pregunta de investigación 23

1.5 Objetivos 23

1.5.1 Objetivo General 23

1.5.2 Objetivos Específicos 23

1.6 Hipótesis 24

2. Metodología 24

3. Impacto y resultados esperados 25

4. Estado del arte 26

4.1 Marco referencial 26

4.1.1 Sistema de Salud en Colombia 29

4.1.2 Actores del Sistema General de Seguridad Social en Salud (SGSSS) 30

4.1.3 Niveles de decisión del Sistema de salud 41

4.1.3.1 Nivel estratégico 41

4.1.3.2 Nivel táctico 42

4.1.3.3 Nivel operativo 42

4.1.4 Campos de aplicación del Sistema de salud 42

4.1.4.1 Planeación estratégica 42

4.1.4.2 Control estratégico 42
4.1.4.3 Planeación táctica 43
4.1.4.4 Control táctico 43
4.1.4.5 Programación 43
4.1.4.6 Control operativo 43
4.1.5 Áreas de aplicación del Sistema de salud 44
4.1.5.1 Financiero 44
4.1.5.2 Operaciones 44
4.1.5.3 Recursos humanos 44
4.1.5.4 Promoción 44
4.1.5.5 Prevención 45
4.1.5.6 Calidad 45
4.1.5.7 Logística 45
4.2 Marco teórico (Adquisición del conocimiento) 46
4.2.1 Revisión de literatura 46
4.2.2 Técnicas de simulación 49
4.2.2.1 Generalidades 49
4.2.2.2 Simulación de eventos discretos 52
4.2.2.3 Dinámica de sistemas 52
4.2.2.4 Simulación basada en agentes 53
4.2.3 Sistemas de soporte a la decisión 54
4.2.3.1 Sistemas de información 54
4.2.3.2 Sistemas de soporte a la decisión 55
4.2.3.3 ¿Qué es un Sistema Basado en Reglas? 58
4.2.4 Métodos de inferencia 61

4.2.4.1 aprendizaje computacional 61
4.2.4.2 Método 1-R 62
4.2.4.3 Método PRISM 62
4.2.4.4 Naive Bayes 63
4.2.4.5 Árboles de decisión 63
4.2.4.6 Algoritmo ID3: 64
4.2.4.7 Algoritmo C4.5 65
5. Representación del conocimiento 66
5.1 Desarrollo de la base de conocimiento 66
5.1.1 Base de datos 66
5.1.2 Generación del árbol de decisión 68
5.1.3 Generación de la base de conocimiento 72
5.2 Desarrollo del mecanismo de inferencia 73
5.3 Verificación del sistema basado en reglas 74
5.4 Desarrollo del Modelo computacional (SETESSCO) 79
6. Toma de decisiones 91
7. Conclusiones 97
7.1 Trabajos futuros 99
8. Referencias 101

TABLA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1 - Publicaciones sobre técnicas de simulación aplicadas al Sector Salud. (Thorwarth, 2009) 14
Ilustración 2 - Aplicaciones de simulación en el sector salud. (Thorwarth, 2009) 14
Ilustración 3 - Etapas del modelo de inteligencia 24
Ilustración 4 - Actores del SGSSS 30
Ilustración 5 - Niveles de decisión 41
Ilustración 6 - Etapa adquisición de conocimiento 46
Ilustración 7 - Campos de aplicación por actor 48
Ilustración 8 - Técnicas de simulación empleadas por nivel de decisión 48
Ilustración 9 - Técnicas utilizadas por campo de aplicación 49
Ilustración 10 - Pasos en un estudio de simulación (Banks, 2005) 51
Ilustración 11 - Ventajas y desventajas de los SBR 61
Ilustración 12 - Estructura de la base de datos 66
Ilustración 13 - Árbol de decisión 71
Ilustración 14 - Medidas de desempeño del clasificador 75
Ilustración 15 - Frecuencia de las publicaciones por año (Long & Meadows, 2018) 77
Ilustración 16 - Número de papers por técnica de simulación a través de los años (Katsaliaki & Mustafee, 2011) 77
Ilustración 17 - Artículos por técnica de simulación a través del tiempo 78
Ilustración 18 - Descripción general SETESSCO 80
Ilustración 19 - Módulo 1: Explorar el Sistema de Salud en Colombia 81
Ilustración 20 – Módulo 2: Selección de la técnica de simulación 82
Ilustración 21 - Resultado de la Selección de la técnica de Simulación 82
Ilustración 22 – Módulo 3: Metodologías de simulación 83
Ilustración 23 – Opción descripción de las metodologías 84
Ilustración 24 – Opción descripción de los componentes 86
Ilustración 25 - Opción descripción de software 90
Ilustración 26 - Respuestas a las preguntas 1 y 2 93
Ilustración 27 - Respuesta a la pregunta 3 94
Ilustración 28 – Respuesta a la pregunta 4 94

Ilustración 29 - Respuesta a la pregunta 5 95
Ilustración 30 - Respuestas a las preguntas 6, 7 y 8 95

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 - Algunos ejemplos de aplicación de modelado y simulación en el cuidado de la salud. (Pitt et al., 2016) 13
Tabla 2 - IPS acreditadas seleccionadas para la identificación de procesos 35
Tabla 3 - Principales procesos de las IPS 35
Tabla 4 - Resumen de las medidas de desempeño con diferentes niveles de profundidad 71
Tabla 5 - Ejemplo de una regla de la base de conocimiento 72
Tabla 6 - Estructura de la Regla 2 74
Tabla 7 - Metodologías de simulación 85
Tabla 8 - Temas incluidos en la descripción de componentes principales 89
Tabla 9 - Preguntas de la encuesta de validación 92
Tabla 10 - Resultados asociados a los objetivos de la investigación 99

RESUMEN

El Sistema de Salud en Colombia ha sido fuente de numerosas críticas generadas por la desigualdad en el acceso a los servicios de salud que tiene la población colombiana, la mala prestación de los servicios de salud, la corrupción, entre otros, que si bien son situaciones ampliamente conocidas que se han estado presentando en los últimos años, el progreso en el mejoramiento de estas situaciones no ha sido muy notorio; en este contexto la presente investigación pretende ofrecer una ventana en el campo académico para abordar algunos de los retos del Sistema de Salud Colombiano mediante técnicas de simulación. Estas técnicas brindan herramientas robustas para el proceso de mejoramiento y toma de decisiones lo que conlleva a que su evaluación sea más rápida y económica que realizar dichos experimentos sobre el sistema real. Los paradigmas de simulación empleados en esta investigación son la simulación discreta, la simulación continua y la simulación basada en agentes, técnicas que tienen determinadas características en sus variables de estado, las interacciones entre las mismas y sus medidas de desempeño, lo cual conlleva a enfrentar el reto de decidir cuál es la mejor técnica a utilizar. En este sentido, la presente investigación pretende diseñar un sistema basado en reglas que a través de la interacción con el usuario permita determinar cuál es la técnica de simulación más apropiada para abordar la problemática de interés del usuario y le indique cuáles son las principales medidas de desempeño, variables, relaciones causales y/o comportamientos de la misma.

PALABRAS CLAVE

Simulación, Sistema de Salud, Simulación de Eventos Discretos, Dinámica de Sistemas, Simulación Basada en Agentes, Sistema Basado en Reglas.

INTRODUCCIÓN

El Sistema de Salud en Colombia ha sido fuente de numerosas críticas generadas por la desigualdad en el acceso a los servicios de salud que tiene la población colombiana, la mala prestación de los servicios de salud, la corrupción, entre otros, que, si bien son situaciones ampliamente conocidas que se han estado presentando en los últimos años, el progreso en el mejoramiento de estas situaciones no ha sido muy notorio. En este contexto, la presente investigación pretende abrir una ventana en el campo académico para abordar los campos del Sistema de Salud Colombiano mediante técnicas de simulación, la pregunta es: ¿Por qué a través de simulación?, bien, la simulación es una herramienta que soporta la toma de decisiones ya que permite en primera medida representar un sistema de la realidad mediante un modelo, y luego de verificar que dicho modelo representa significativamente la realidad, se pueden realizar experimentos sobre el mismo, lo cual resulta más rápido y económico que realizar dichos experimentos sobre el sistema real.

Existen diferentes técnicas de simulación, para efectos de la presente investigación se hará énfasis en tres de ellas: La simulación Discreta (SD), la Simulación Continua (SC) y la Simulación Basada en Agentes (SBA), cada una de estas técnicas está diseñada para abordar problemas que tienen determinadas características en sus variables de estado, las interacciones entre las mismas y sus medidas de desempeño, lo cual lleva a decidir cuál es la mejor técnica a utilizar. En este sentido, la presente investigación pretende diseñar un sistema basado en reglas que a través de la interacción con el usuario permita determinar cuál es la técnica de simulación más apropiada para abordar la problemática de interés del usuario y le indique cuáles son las principales medidas de desempeño variables, relaciones causales y/o comportamientos de la misma.

El Sistema General de Seguridad Social en Salud (SGSS) dentro de su estructura se conforma básicamente por ocho (8) actores: El Ministerio de Salud y Protección Social, La Administradora de los recursos del Sistema General de Seguridad Social en Salud (ADRES), las Entidades Promotoras de Salud (EPS), las Instituciones Prestadoras de Servicios (IPS), la Superintendencia Nacional de Salud, el Instituto Nacional de Salud (INS),

las Secretarías Distritales de Salud y el Instituto Nacional de Vigilancia de Medicamentos y Alimentos (INVIMA) [1]. Cada uno de estos actores aportan al funcionamiento del Sistema de Salud en sus niveles micro, meso y macro, además internamente, cada uno cuenta con su propia estructura. Las múltiples interacciones entre estos elementos son las causantes de la complejidad del sistema. De hecho, el Sistema de Salud puede ser dividido en subsistemas los cuales tienen propiedades intrínsecas que permiten clasificarlos como sistemas discretos, continuos o basados en agentes y por lo tanto pueden ser modelados utilizando alguna de estas técnicas de simulación.

De acuerdo con los últimos estudios realizados por el Ministerio de Salud se le impone un conjunto de retos y desafíos tanto operativos como estratégicos. En cuanto a los retos de tipo operativo, se destacan el de cerrar las brechas en salud tanto en calidad como en cobertura, desarrollar la gestión integral del riesgo, mejorar los incentivos para diferentes actores del sistema y en especial al talento humano en salud, fortalecer la promoción y prevención, los hábitos saludables y el autocuidado y otras. Los retos relacionados con la estrategia apuntan a la definición de las leyes que garanticen los mecanismos de protección y de exclusiones del sistema, consolidación dela política farmacéutica y el control de precios de tecnologías, preservación en el equilibrio y saneamiento financiero de los actores del sistema, entre los más importantes. Todos estos retos también han sido abordados por otros actores que han empelado diferentes técnicas y herramientas para estudiarlas y proponer alternativas de solución, técnicas que incluyen desde luego el modelado matemático y en especial la simulación.

Las técnicas de modelado aplicado a los sistemas de salud no es algo novedoso, pues ya en 1950 [3] algunos planeadores utilizaban técnicas de modelado para el agendamiento de citas [4]. Pitt et al. presentan los tres métodos comúnmente utilizados para el modelado y simulación en los sistemas de salud, dentro de los que se encuentra el modelado cualitativo usado para diagramar la estructura del problema, incluyen técnicas como la de mapeo cognitivo, mapeo de procesos, métodos blandos de modelado (*Soft Systems Methods* - SSM), opciones estratégicas y análisis de decisiones (*Strategic Options y Decision Analysis*-SODA). El segundo método es el modelado matemático que permite evaluar los trade-offs usando información cuantitativa se encuentran herramientas como la regresión, pronóstico, métodos de optimización, teoría de colas y cadenas de Markov. El último

método es la Simulación la cual es adecuada para realizar análisis de escenarios, algunas técnicas son la simulación de eventos discretos, la dinámica de sistemas, la simulación de Monte Carlo, Simulación Basada en Agentes [5]. El uso de técnicas de simulación para el modelado de problemáticas relacionadas con los Sistemas de Salud ha tenido un desarrollo creciente en los últimos años, según lo presentado por [6] la simulación discreta se ha convertido en una herramienta atractiva para el modelado del comportamiento del sistema de salud y se ha utilizado para representar los flujos de pacientes a través del sistema, permitiendo el estudio de líneas de espera, uso de la capacidad disponible y en general evaluar escenarios en los que se realizan modificaciones a las entradas del modelo para evaluar las posibles salidas teniendo en cuenta la incertidumbre y complejidad del sistema, y de esta manera soportar la toma de decisiones [7].

Si bien, se han evidenciado las bondades de abordar las problemáticas de los Sistemas de Salud a través del uso de simulación, seleccionar la técnica más apropiada para el modelado representa un desafío, sobre el cual

La *International Society for Pharmacoeconomics and Outcomes Research* (ISPOR) es una entidad dedicada a mejorar los procesos de toma de decisión en temas relacionados al cuidado de la salud y a través del trabajo desarrollado por Marshall et al. se propone una lista de chequeo que funciona como guía para en un primer lugar establecer si es apropiado modelar el problema mediante técnicas de simulación, la lista de chequeo consta de ocho elementos: sistema, interacciones, multinivel, entendimiento, bucles, agentes, tiempo y emergencia. Cada elemento conduce a comprender si en el problema que se está abordando intervienen múltiples actores, que interactúan entre sí, si el sistema tiene salidas que son difíciles de predecir, a qué nivel se encuentra el problema, si el problema puede ser resuelto o no de manera analítica, si se presentan ciclos de retroalimentación, si están involucrados en el problema múltiples agentes que cambian el desempeño del sistema, cual es la forma en la que cambia el tiempo del sistema y si se generan o no comportamientos emergentes. Si dichos elementos se encuentran presentes en el problema de estudio, la recomendación es utilizar la simulación como mecanismo para abordar la problemática (Marshall, Burgos-liz, Eng, Ijzerman, Osgood, et al., 2015). Una segunda parte de este trabajo de investigación, se dedica a proponer una guía para seleccionar el método de simulación entre la Simulación de Eventos Discretos, la Dinámica de Sistemas y la

Simulación Basada en Agentes que es más favorable para el modelado de problemas del sector salud, la selección se realiza teniendo en cuenta 14 aspectos de los cuales 5 son relevantes, el aspecto más importante es el propósito del modelo, los 14 aspectos son: el tipo de problema, la perspectiva, la resolución, el origen de la dinámica, el manejo del tiempo, el acercamiento, los bloques básicos que lo conforman, la fuente de los datos, la unidad de análisis, la formulación matemática, las salidas, el mantenimiento del modelo, el tiempo de desarrollo y el costo (Marshall, Burgos-Liz, et al., 2015).

Dentro de la literatura consultada se evidencia que se han desarrollado modelos de simulación para representar subsistemas del sector salud, la pregunta en cuestión es: ¿cómo determinar cuál es la técnica más apropiada para realizar dicha representación y cuáles serían las medidas de desempeño, variables, relaciones causales, y/o comportamientos emergentes que permitirán realizar una buena representación de la realidad a través de un modelo de simulación? La respuesta a este interrogante es de suma importancia ya que permitiría decidir qué técnica de simulación utilizar para modelar el comportamiento de los diferentes sistemas garantizando que la misma generara una alta verosimilitud con el modelo real y que en términos de utilización de recursos es eficiente. En este sentido se indica que la selección de la técnica de simulación es un problema que depende de múltiples factores organizacionales, como los parámetros del problema, los *trade-offs*, recursos, habilidades, etc. [5] y su importancia se fundamenta en el grado en el cual se busca capturar las interacciones de los agentes, la disponibilidad de conjuntos de habilidades requeridas, la disponibilidad del conocimiento de los procesos o los datos requeridos, que el tiempo de simulación sea aceptable, la flexibilidad del modelo, las salidas de interés, las escalas, la alta o baja heterogeneidad de la población, el grado en el cual el modelo representa la realidad [8].

El modelado de estos subsistemas permite en primera instancia comprender la forma en la que interactúan los elementos que lo conforman, para que una vez se haya validado estadísticamente la verosimilitud de dicho modelo con el sistema real, se puedan realizar proyecciones del sistema en estudio y posteriormente realizar análisis de escenarios que permitan comprender los posibles efectos que traería sobre el comportamiento del sistema cambios bien sea en los elementos que lo conforman o las interacciones entre los mismos. Dado que existe una técnica de simulación apropiada para cada problema que se requiere

abordar, cuya selección depende de los objetivos que el modelador pretende alcanzar a través del modelo, las variables, parámetros, relaciones causales y comportamientos. Teniendo en cuenta lo anterior, el presente trabajo pretende desarrollar un sistema basado en reglas que permita que un usuario logre determinar cuál es la técnica de simulación más adecuada para el modelado de las diferentes situaciones problémica que se presentan en el sistema de salud colombiano y a su vez cuáles son los objetivos, las variables, relaciones causales y/o comportamientos que se deben tener en cuenta para el modelado de este.

1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1 ANTECEDENTES

Las técnicas de modelado aplicadas a los sistemas de salud no es algo novedoso, pues ya en 1950 los planeadores utilizaban técnicas de modelado para el agendamiento de citas (Modelling & Network, 2014). Pitt et al. presentan los tres métodos comúnmente utilizados para el modelado y simulación en los sistemas de salud, dentro de los que se encuentra el modelado cualitativo usado para diagramar la estructura del problema, dentro de este método se encuentran: el Mapeo cognitivo, mapeo de procesos, *Soft Systems Methods* (SSM), *Strategic Options y Decision Analysis* (SODA). El segundo método es el modelado matemático que permite evaluar los trade-offs usando información cuantitativa se encuentran herramientas como la regresión, pronóstico, métodos de optimización, teoría de colas y cadenas de Markov. El último método es la Simulación la cual es adecuada para realizar análisis de escenarios, algunas técnicas son la simulación de eventos discretos, la dinámica de sistemas, la simulación de Monte Carlo, Simulación Basada en Agentes (Pitt, Monks, Crowe, & Vasilakis, 2016).

El uso de técnicas de simulación para el modelado de problemáticas relacionadas con los Sistemas de Salud ha tenido un desarrollo creciente en los últimos años, según lo presentado por (Thorwarth, 2009) la simulación discreta se ha convertido en una herramienta atractiva para el modelado del comportamiento del sistema de salud y se ha

utilizado para representar los flujos de pacientes a través del sistema, permitiendo el estudio de líneas de espera, uso de la capacidad disponible y en general evaluar escenarios en los que se realizan modificaciones a las entradas del modelo para evaluar las posibles salidas teniendo en cuenta la incertidumbre y complejidad del sistema, y de esta manera soportar la toma de decisiones.

Algunas aplicaciones de técnicas de modelado de sistemas mediante las cuales se han abordado temas relacionados con el cuidado de la salud:

TEMA TRATADO	TÉCNICA APLICADA
Planeación de la capacidad de servicios médicos de emergencia en Gales	Pronósticos, Teoría de colas, *scheduling*, simulación de eventos discretos integrada con herramientas de la planeación de la capacidad.
Aplicación de simulación y teoría de colas para la valoración de la salud mental.	Teoría de Colas. Simulación de eventos discretos.
Simulación de los servicios de ortopedia.	*Pathway mapping*. Estructuración de problemas. Simulación de eventos discretos.
Trabajo de investigación de operaciones con cirujanos para desarrollar una herramienta de monitoreo.	Modelos matemáticos de riesgo. Herramientas de visualización.
Exploración del impacto de la implementación de la Estrategia Nacional de Demencia.	Estructuración de problemas Dinámica de Sistemas.
Modelo geográfico diseñado para analizar escenarios de demanda siguiendo la propuesta de reubicación hospitalaria.	Modelos geográficos. Pronósticos.
Aumento del acceso a terapias psicológicas.	*Pathway mapping*. Simulación de eventos discretos. Modelos de planeación de fuerza de trabajo.

Tabla 1 - Algunos ejemplos de aplicación de modelado y simulación en el cuidado de la salud. (Pitt et al., 2016)

Actualmente existen organizaciones que se dedican al desarrollo de estudios enfocados en mejorar la eficiencia y eficacia de los servicios de cuidado y mejoramiento de la salud tal como la International Society for Pharmacoeconomics and Outcomes Research (ISPOR) o Health Services Research (HSR) del Reino Unido. Dentro del trabajo realizado por este tipo de instituciones se pueden encontrar investigaciones que utilizan la simulación como herramienta para abordar problemáticas del Sector Salud, lo cual deja en evidencia que la misma toma cada vez más relevancia dentro de los estudios que buscan mejorar el rendimiento del Sistema de Salud en cada uno de sus niveles.

La aplicación de técnicas de simulación ha tenido un incremento considerable en los últimos años, la gráfica a continuación muestra el número de publicaciones realizadas desde el año 1995 hasta el año 2008 acerca de técnicas de simulación aplicadas al sector salud.

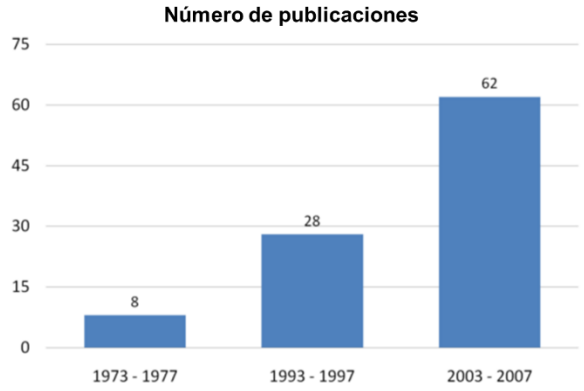


Ilustración 1 - Publicaciones sobre técnicas de simulación aplicadas al Sector Salud. (Thorwarth, 2009)

Se puede evidenciar que las publicaciones han tenido un aumento considerable desde comienzos de este milenio. Estas publicaciones pueden ser clasificadas dentro de cinco campos: Los hospitales, provisión de salud demográfica, departamentos de emergencia, pacientes ambulatorios y cadena de suministro para el cuidado de la salud.

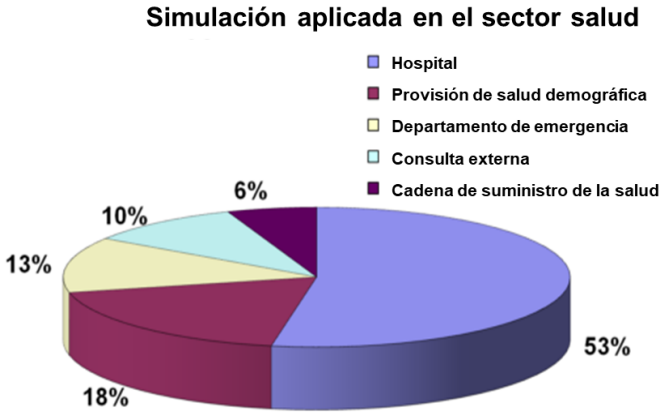


Ilustración 2 - Aplicaciones de simulación en el sector salud. (Thorwarth, 2009)

Continuando con las aplicaciones de simulación discreta a problemas de los sistemas de salud, se encuentran modelos desarrollados dentro de los años 2014 – 2018 donde a nivel general se observa que son dos los objetivos principales de los modelos de simulación, el primero es mejorar el nivel de servicio representado en bajos tiempos de espera por parte de los pacientes, y el segundo es la maximización del uso de recursos, representado en el porcentaje de utilización de personal médico, recursos físicos como camas, laboratorios, salas de cirugía, etc. Ejemplo de ello, es el modelo planteado por Vargas & Giraldo donde simulan los costos de prestación de los servicios de una EPS en un año como mecanismo de planeación (Vargas & Giraldo, 2014), se presentan también modelos que buscan diseñar las rutas de atención adecuadas para pacientes que presentan emergencias médicas como Accidente Cerebrovascular (ACV) (Pitt et al., 2016) o ataque isquémico transitorio (AIT) (Chemweno, Thijs, Pintelon, & Horenbeek, 2014) el diseño de estas rutas pretende ofrecer a los pacientes una atención oportuna que evite los daños permanentes en los pacientes. Otros modelos diseñan las rutas de atención de los pacientes con el objetivo de minimizar el consumo innecesario de recursos lo que se ve reflejado en una disminución de los costos de prestación del servicio, un ejemplo de esto es el modelo para el diseño de rutas clínicas de pacientes ortopédicos con fracturas presentado por (Anderson et al., 2017). La programación de citas médicas es otro campo donde la simulación ha sido utilizada, por ejemplo, la programación de exámenes médicos es un problema en el que se pueden subutilizar partes de la infraestructura mientras que otras se encuentran congestionadas (Asamoah, Sharda, Rude, & Doran, 2018) o la programación de citas médicas especializadas como lo es la ortopedia buscando minimizar el tiempo de espera de los pacientes mientras se aumenta la cantidad de pacientes atendidos (Baril, Gascon, & Cartier, 2014). Otro campo importante son los problemas inherentes a los Departamentos de Emergencia, estos se caracterizan por tener recursos limitados y demandas bastante cambiantes lo que genera congestiones, altos tiempos de espera y barreras para que los pacientes accedan a una atención adecuada, por lo que mediante modelos de simulación se busca diseñar estrategias que mejoren el funcionamiento de estos departamentos (Meng, 2018), (Nieuwenhuyse, 2015), sin embargo, los recursos no son limitados únicamente en los Departamentos de Emergencias, sino en otras áreas de los hospitales, por ejemplo, la planeación y programación de camas es fundamental para brindar una atención oportuna a los pacientes a la vez que se realiza una gestión adecuada (Devapriya

et al., 2015); otro tipo de recurso son las ambulancias fundamentales para brindar atención oportuna a emergencias, por lo que diseñar estrategias para su programación que generen tiempos de respuesta adecuados (Pinto, Silva, & Young, 2015). Las salas para suministrar tratamiento a los pacientes con cáncer es un problema complejo de administración de recursos debido a la gran cantidad de variables y restricciones que se deben tener en cuenta, por ejemplo, se debe tener en cuenta que el tratamiento no es estándar sino que varía para cada paciente, además se busca que el paciente quede complemente sano o en caso de no ser posible mejorar su calidad y esperanza de vida según la etapa de la enfermedad en la que se encuentre, mientras se realiza una adecuada utilización de los recursos de las entidades de salud (Alvarado, Cotton, Ntaimo, & Pe, 2020). Las políticas y programas de promoción y prevención de enfermedades han sido también estudiados mediante simulación, por ejemplo, para pacientes con Parkinson (Lebcir, Demir, Ahmad, Vasilakis, & Southern, 2017) o programas de prevención de aneurisma aórtica abdominal (AAA) (Lebcir et al., 2017).

Dentro de las aplicaciones de modelos de Dinámica de Sistemas en este mismo período de tiempo se encuentran modelos dedicados a estudiar el comportamiento de la demanda en el largo plazo con el objetivo de soportar la toma de decisiones estratégicas sobre la planeación de infraestructura para el suministro de servicios de salud (Anderson et al., 2017)(Anderson et al., 2017) y el análisis de costos totales de un sistema de salud a largo plazo para establecer la financiación del mismo del gasto fiscal (X. Wang, Sun, Mu, Guan, & Li, 2015).

Finalmente, en cuanto las aplicaciones realizadas mediante Simulación Basada en Agentes Iqbal et al. las clasifica en cinco grupos el primero es la planeación y administración de recursos, donde se encuentran trabajos relacionados con el diseño de políticas para la atención de pacientes en las salas de emergencias, programación de personal médico, el segundo grupo es de sistemas de soporte de decisiones y sistemas basados en conocimiento donde se plantean modelos que identifican patrones para el desarrollo de políticas y herramientas para la toma de decisión que incluyen la recolección de datos, diagnóstico, evaluación y planeación de tratamientos médicos, el tercer grupo son los sistemas de administración de datos, el cuarto es la atención domiciliaria de pacientes y el

último grupo es la creación de hospitales virtuales para la solución de problemas de los mismos (Iqbal, Altaf, Aslam, Mahmood, & Khan, 2016).

Tracy et al. realizan también una revisión de las aplicaciones realizadas de Simulación Basada en Agentes a problemas de salud pública, donde se incluyen la epidemiología de enfermedades infecciosas, el control de enfermedades no transmisibles, los comportamientos que impactan la salud y la epidemiología social; el segundo grupo es el de (Tracy, Cerdá, & Keyes, 2018). Isern clasifica las aplicaciones según los agentes a los cuales están dirigidas como las centradas en los pacientes que tienen por objetivo principal proveer de un servicio a los pacientes, las centradas en el personal que son aplicaciones diseñadas para facilitar las tareas del personal médico y las centradas en las organizaciones del cuidado de la salud donde se pretende identificar debilidades de las organizaciones para diseñar estrategias de mejora (Isern & Moreno, 2016).

Dentro de otros modelos consultados, se encuentran modelos basados en agentes que estudian la transmisión de enfermedades como la gripa H1N1 que busca establecer estrategias para minimizar el porcentaje de personas contagiadas (Song, Ge, Duan, & Qiu, 2016), se estudia también el efecto que tiene sobre los indicadores tanto de servicio como financieros de los hospitales la transferencia de pacientes a otras instituciones médicas bien sea por su propia decisión (Alibrahim & Wu, 2018) o de los pacientes que llegan a través de ambulancia y que deben ser derivados por la congestión que se presentan en los hospitales (Pförringer, Breu, Crönlein, Kolisch, & Kanz, 2018), este tipo de congestiones son típicas de los departamentos de emergencia por lo que el uso de agentes es una alternativa para soportar la toma de decisiones que eviten las pérdidas de recursos (Yousefi & Ferreira, 2017) teniendo en cuenta múltiples condiciones como lo son la programación del persona, la demanda, la programación de pacientes, la propagación de recursos físicos, etc. (Liu, Rexachs, Epelde, & Luque, 2017). La atención domiciliaria también ha sido modelada a través de la simulación basada en agentes, buscando responder a situaciones estocásticas como la reprogramación de citas mientras se reducen los costos de operación (Xie & Wang, 2017).

Otros modelos tienen como objetivo estudiar fenómenos en el largo plazo como lo es el pronóstico del tamaño de la fuerza de trabajo médica necesaria para una nación (Lopes,

Almeida, & Almada-Lobo, 2018) o la planeación de los recursos públicos para su inversión en infraestructura velando por el mejoramiento de la salud pública y las salidas económicas (Kruzikas et al., 2014), en cuanto a salud pública se presenta también el diseño de programas de promoción de salud mental que mejoren la calidad de vida de los habitantes de la región mientras se disminuyen los costos inherentes al tratamiento de estas enfermedades (Silverman, Hanrahan, Bharathy, Gordon, & Johnson, 2015).

Otros autores utilizan una combinación de las técnicas mencionadas anteriormente para realizar el modelado de problemáticas del sector salud, por ejemplo, en la combinación de la Simulación Basada en Agentes con la Simulación de Eventos Discretos, Viana et al. evalúan a través de un modelo la viabilidad del cuidado en casa como una alternativa para combatir la congestión de los hospitales, así como la poca disponibilidad de recursos y los altos costos de operación (Prgho et al., 2017), otro trabajo utiliza la Simulación de Eventos Discretos para representar el impacto de los cambios en un departamento ortopédico y la Simulación Basada en Agente para representar la toma de decisiones por parte de los agentes el objetivo es aumentar el nivel de servicio reduciendo los tiempos de espera de los pacientes (Kittipittayakorn & Ying, 2016), Kaushal et al. proponen un modelo en el que evalúan la implementación de una política *fast track* en un departamento de urgencias buscando minimizar los tiempos de espera de los pacientes (Kaushal et al., 2015), por último, está el modelo que utilizando teoría de colas y Simulación Basada en Agentes pretende identificar cuáles son los factores que generan aumentos en los tiempos de espera de los pacientes en cada una de las unidades de un hospital (Ostermann, 2015).

Se han implementado otras técnicas de investigación de operaciones como los procesos Markovianos de decisión sobre para realizar la programación de terapias de radiación de pacientes con cáncer (Gocgun, 2018), las redes de Petri que representan las unidades médicas como redes complejas con diversidad de recursos tanto clínicos como administrativos, el objetivo es proveer un modelo matemático para soportar la toma de decisiones de planeación y programación de servicios de salud en salas de emergencia (J. Wang, Tian, & Sun, 2018), quirófanos, farmacias, etc. (Augusto & Xie, 2014) o Simulación de Montecarlo para la programación de los turnos de las enfermeras buscando minimizar la saturación del sistema al tiempo que se tienen en cuenta las necesidades de atención de cada paciente (Sarno & Elena, 2016).

Como se puede evidenciar la simulación es una herramienta ampliamente utilizada para el modelado de los problemas del sector salud en cada uno de sus niveles, estratégico, táctico y operativo y que pueden ser usadas una combinación de técnicas, como técnicas puras, con el objetivo de determinar cuál es la técnica más apropiada para modelar esas situaciones.

1.2 JUSTIFICACIÓN

La simulación permite tomar un sistema del mundo real y estudiarlo científicamente para entender su funcionamiento, el cual se basa en suposiciones que generalmente son interacciones lógicas o matemáticas que constituyen un modelo que busca entender como es el comportamiento del sistema.

Dentro de los sistemas del mundo real algunos pueden ser estudiados de manera analítica utilizando algebra, cálculo, probabilidad, entre otros; sin embargo, cuando las relaciones entre los sistemas son más complejas, es necesario utilizar la simulación. Esta técnica permite analizar los datos arrojados por el sistema para poder estimar el comportamiento del mismo. Algunas de las áreas en las cuales se ha utilizado la simulación como una poderosa herramienta es el diseño y análisis de sistemas productivos, evaluación de requerimientos de hardware y software, diseño de tácticas militares, diseño de políticas de inventario, diseño y operación de instalaciones de transporte, evaluación de diseños para el servicio de organizaciones como hospitales, oficinas de correo, restaurantes y para el análisis de sistemas económicos y financieros.

El uso de la simulación tiene algunas ventajas, por ejemplo, permite realizar la evaluación de políticas o realizar cambios en el sistema simulado sin necesidad de afectar el sistema real, es decir realizar análisis del tipo que pasaría si…, además el tiempo en el que desarrolla la simulación es mucho más corto que el tiempo del sistema real, lo que permite observar cambios en periodos de tiempo mucho más cortos, permite evidenciar la interacción entre las variables y la relevancia de cada una dentro del sistema (Banks, 2005).

Algunas desventajas del uso de la simulación son que, a mayor complejidad del problema, el esfuerzo requerido para modelar el mismo computacionalmente es mucho mayor, así como el tiempo computacional requerido.

Los sistemas pueden se pueden clasificar dentro de dos categorías: discretos o continuos, los primeros son aquellos en los que la variable de estado cambia instantáneamente en puntos separados en el tiempo, mientras que la variable de estado de los sistemas continuos cambia continuamente en el tiempo. Sin embargo, rara vez un sistema es completamente discreto o completamente continuo, así que la clasificación en una u otra categoría se realiza basado en el comportamiento que predomina en el sistema. (Law & Kelton, 1991).

Ahora bien, la simulación es una técnica utilizada para el modelado de Sistemas Adaptativos Complejos (CAS por sus siglas en inglés) este fue término acuñado por Holland en 1992 para hacer referencia a los numerosos agentes que están experimentando simultáneamente interacciones no lineales con los demás agentes (Tien & Goldschmidt-Clermont, 2009). Algunos autores a través de sus trabajos de investigación han identificado las características que hacen los sistemas de salud, sistemas adaptativos complejos. Según Tien et al son seis las características que hacen que los sistemas de salud sean considerados complejos, la primera es la dificultad del sistema para definir el propósito del sistema debido a la gran cantidad de stakeholders (pacientes, médicos, aseguradoras, etc.) y dado que también tiene un propósito económico es casi imposible determinar un propósito único para el modelo, la segunda característica hace referencia a que el límite del sistema es cambiante y no es claro ni en lo que respecta a los límites espaciales (oficinas, clínicas, hospitales, etc.), temporales (programaciones, actividades, recursos, etc.) ni las interdependencias (cadenas de suministro, cadenas de demanda, etc.). La tercera característica hace referencia a la robustez del modelo pues se requiere confiabilidad, calidad, eficiencia (minimizar costos, inventarios, desperdicios, etc.) y efectividad (maximizar la utilización de recursos, satisfacción de los usuarios, etc.), la cuarta característica es el desarrollo del sistema que sería basado en modelos que requieren escalabilidad y sustentabilidad, la quinta característica es que el despliegue del sistema tendría el mínimo de riesgo e incertidumbre respecto al sistema real, ya que actitudes inesperadas, demoras súbitas, efectos secundarios adversos, no se podrían tener en

cuenta con facilidad, la sexta característica es que la operación del sistema debe ser flexible y segura y la última característica es que los ciclos de vida del sistema deben ser predecibles (en lo que respecta a las entradas, procesos, salidas, etc.), controlables (uso de sensores apropiados, retroalimentación, cibernética, etc.) y evolutivo (capacidad de aprendizaje, crecimiento inteligente, etc.) (Tien & Goldschmidt-Clermont, 2009). Otro trabajo es el de Leykum et al en su trabajo establecen que los sistemas de salud poseen características de sistemas complejos: están conformado por individuos que aprenden, que procesan información y reaccionan a los cambios, además dichos agentes tienen interconexiones y las salidas del sistema son el resultado de interacciones entre los individuos más que por las habilidades o los comportamientos individuales, los sistemas son autoorganizados, el orden surge de las interacciones entre individuos, las cuales no pueden ser completamente entendidas o impuestas desde fuera del sistema, estas salidas son no lineales y emergentes y el desempeño del sistema no es predecible a través del tiempo. En este trabajo se realiza un énfasis especial en la incertidumbre, una de las principales características de los sistemas complejos que, si bien hace a los sistemas impredecibles, no implica que son totalmente aleatorios, por el contrario, los patrones de las trayectorias pueden ser informativos. En este trabajo se lograron identificar los conjuntos de atributos más significativos que impactan la incertidumbre, el primero de ellos son los relacionados con la enfermedad dentro de los cuales se encuentra la evolución que puede tener un paciente y que lo lleva a cambiar de un estado a otro o el grado de autocuidado que tiene un paciente una vez es dado de alta; el segundo es la incertidumbre relacionada con las tareas esto se da debido a que no todas las tareas están estandarizadas, algunas requieren ser personalizadas según el caso, se encuentra también el grado en el cual un paciente requiere cuidado por parte de varios agentes, pues entre más agentes se requieran para tratar un paciente mayor será el nivel de incertidumbre, una tendencia en el sector salud es crear equipos diversos para brindar servicios de salud y finalmente que tan común es la enfermedad ya que las menos comunes generan mayor incertidumbre (Leykum et al., 2014).

Dentro de la literatura consultada se evidencia que se han desarrollado modelos de simulación para representar subsistemas del sector salud, la cuestión es: ¿cómo determinar cuál es la técnica más apropiada para realizar dicha representación y cuáles serían las

medidas de desempeño, variables, relaciones causales, y/o comportamientos emergentes que permitirán realizar una buena representación de la realidad a través de un modelo de simulación? La respuesta a este interrogante es de suma importancia ya que permitiría decidir qué técnica de simulación utilizar para modelar el comportamiento de los diferentes sistemas garantizando que la misma generara una alta verosimilitud con el modelo real y que en términos de utilización de recursos es eficiente.

La selección de la técnica de simulación es un problema que depende de múltiples factores organizacionales, como los parámetros del problema, los *trade-offs*, recursos, habilidades, etc. (Pitt et al., 2016) y su importancia se fundamenta en el grado en el cual se busca capturar las interacciones de los agentes, la disponibilidad de conjuntos de habilidades requeridas, la disponibilidad del conocimiento de los procesos o los datos requeridos, que el tiempo de simulación sea aceptable, la flexibilidad del modelo, las salidas de interés, las escalas, la alta o baja heterogeneidad de la población, el grado en el cual el modelo representa la realidad (Marshall, Burgos-liz, Eng, Ijzerman, Crown, et al., 2015).

1.3 FORMULACIÓN

El modelado de los subsistemas que conforman el sistema de salud permite en primera instancia comprender la forma en la que interactúan los elementos que los conforman, para que una vez haya sido validado estadísticamente la verosimilitud de dicho modelo con el sistema real, se puedan realizar proyecciones del sistema en estudio y posteriormente realizar análisis de escenarios que permitan comprender los posibles efectos que traerían sobre su comportamiento los cambios bien sea en los elementos que lo conforman o las interacciones entre los mismos.

Dado que existe una técnica de simulación apropiada para cada problema que se requiere abordar, cuya selección depende de los objetivos que el modelador pretende alcanzar a través del modelo, las variables, parámetros, relaciones causales y comportamientos, el presente trabajo pretende desarrollar un sistema basado en reglas que permita que un usuario logre determinar cuál es la técnica de simulación más adecuada para el modelado de las diferentes situaciones problémicas que se presentan en el sistema de salud

Colombiano y a su vez cuáles son los objetivos, las variables, relaciones causales y/o comportamientos que se deben tener en cuenta para el modelado del mismo.

1.4 PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

¿Cuál es la base de conocimiento y el mecanismo de inferencia necesarios para la selección de la técnica de simulación apropiada para el modelado de los subsistemas que componen el Sistema de Salud Colombiano y que presentan los problemas más representativos de este sector?

1.5 OBJETIVOS

1.5.1 Objetivo General

Desarrollar un sistema basado en reglas que permita determinar la técnica de simulación más recomendada y los principales componentes en el modelado del aspecto inherente al Sistema de Salud Colombiano seleccionado por el usuario.

1.5.2 Objetivos Específicos

- Identificar los subsistemas que componen el Sistema de Salud en Colombia, sus elementos, variables, relaciones causales y comportamientos que constituirán la base del conocimiento del Sistema Basado en Reglas.
- Determinar el conjunto de reglas que describen las relaciones existentes entre la información recolectada y que darán origen al mecanismo de inferencia del Sistema Basado en Reglas.
- Desarrollar una aplicación computacional que le permita al usuario de la misma interactuar con el Sistema Basado en Reglas.
- Indicar al usuario de la aplicación, la información que requiere tener disponible para desarrollar el proyecto de simulación mediante la técnica recomendada.

1.6 HIPÓTESIS

Mediante el Sistema Basado en Reglas (SBR) propuesto, un usuario de la simulación sabrá cuál de las posibles herramientas de esta técnica podrá ser aplicada en un problema específico del Sistema de Salud en Colombia.

Así mismo, este SBR le guiará en que componentes básicos, así como requerimientos de información deberá disponer el usuario para minimizar los fracasos en el empleo de la simulación para representar un subsistema específico contenido en el Sistema de Salud Colombiano objeto de un proyecto de simulación.

2. METODOLOGÍA

Para el desarrollo del trabajo se utilizará el modelo de inteligencia (Álvarez Pomar, 2016) cuyas etapas se describen a continuación:

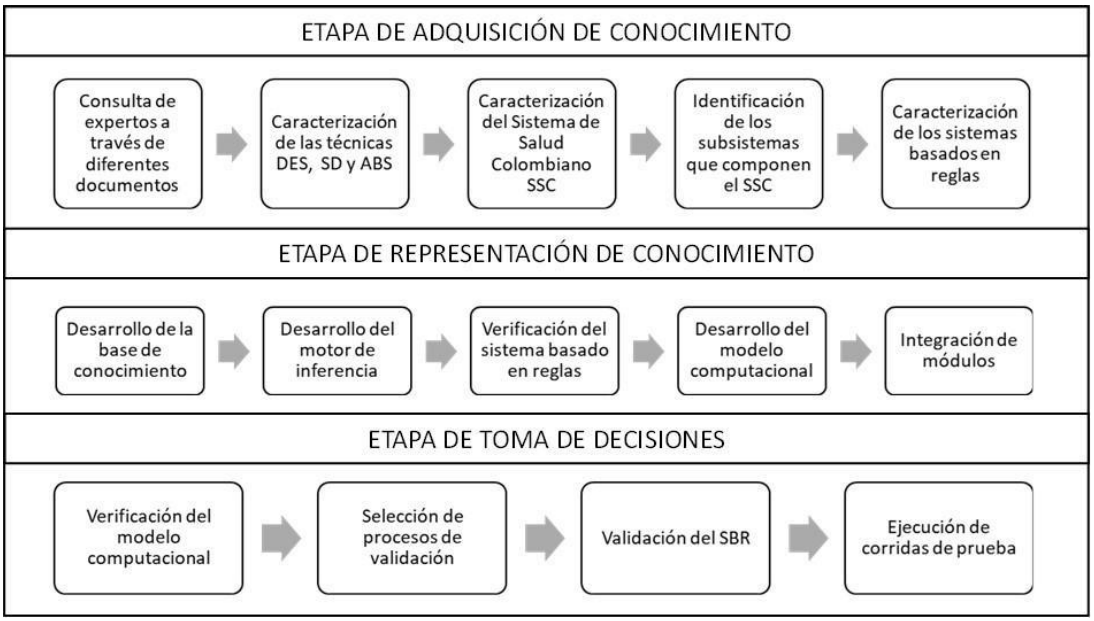


Ilustración 3 - Etapas del modelo de inteligencia

Etapa de adquisición: En esta etapa se realiza la recolección de información, la cual se puede realizar a través de la revisión de *papers*, libros, entrevistas a expertos, entre otros, lo que permitirá identificar el conocimiento vital para la sostenibilidad del sistema.

Etapa de representación: Se representa un sistema real a través de modelos matemáticos y de simulación terminan siendo representados por un modelo computacional. Esta representación hace explícitos los elementos del sistema, así como sus interacciones.

Etapa toma de decisiones: Se realizan modificaciones sobre el modelo realizado en la etapa de representación para determinar el impacto que generarían dichos cambios sobre las medidas de desempeño y de esta soportar la toma de decisiones.

3. IMPACTO Y RESULTADOS ESPERADOS

El resultado esperado es un modelo computacional que permita al usuario ingresar la información acerca de la situación relacionada con el sistema de salud que desea abordar mediante técnicas de simulación, para que sea el modelo computacional el que le indique al usuario cuál es la técnica de simulación más conveniente, así como las principales variables, relaciones causales y/o comportamientos que debería tener en cuenta a la hora de realizar el modelado de la situación.

Dentro de las partes interesadas se encuentran directamente relacionados los investigadores que buscan una herramienta que permita soportar la decisión de la selección de la técnica de simulación que por las características de la situación a modelar mejor podría representar el comportamiento de la misma, además, de las medidas de desempeño y los principales elementos del sistema que se deben tener en cuenta en el momento de realizar el modelo de simulación. Indirectamente relacionados se encuentran los actores que conforman el Sistema de Salud en Colombia y que desean utilizar la simulación como herramienta para la toma de decisiones a nivel estratégico, táctico y/o operativo.

En ese orden de ideas, este proyecto constituye la base para el desarrollo de múltiples investigaciones cuyo objetivo sea mejorar el desempeño de los subsistemas del Sistema de Salud en Colombia mediante el uso de técnicas de simulación, el modelo aquí planteado constituye una herramienta para soportar la toma de decisiones del investigador acerca de la técnica de simulación más adecuada para el modelado de su objeto de estudio.

Además de obtener la primera versión del aplicativo computacional mencionado anteriormente, se espera realizar la publicación de un artículo en revista nacional que permitan mostrar a la comunidad académica el desarrollo de la investigación, así como presentar estos resultados en una ponencia en un evento académico nacional.

4. ESTADO DEL ARTE

4.1 MARCO REFERENCIAL

El Sistema General de Seguridad Social en Salud (SGSS) en Colombia tiene como objetivo principal regular el servicio público esencial de salud a la vez que crea las condiciones de acceso para toda la población en cualquier nivel de atención requerido, este objetivo se encuentra establecido en la Ley 100 de 1993 donde también se plantean los principios y en general el funcionamiento de dicho sistema.

Los principios bajo los cuales se fundamenta todo el SGSS son la Eficiencia, universalidad, solidaridad, integralidad, unidad y participación que están alineadas con unas reglas generales para la prestación del servicio que son Equidad, Obligatoriedad, Protección integral, Libre escogencia, Autonomía de las instituciones, Descentralización administrativa, Participación social, concertación y Calidad (Carlos, Instructor, Pública, & Medicina, 2001). El sistema se divide en dos tipos de regímenes: el régimen contributivo (RC) y el régimen subsidiado (RS), en el primero se encuentran amparadas todas las personas que son afiliadas al SGSS debido a que cuentan con un contrato laboral bien sean servidores públicos o privados, en este grupo se encuentran también las personas pensionadas y

trabajadores independientes que tengan capacidad de pago, este tipo de afiliados junto con sus empleadores aportan mensualmente una cotización que depende de sus ingresos y que son la fuente de financiamiento del RC. En el segundo régimen se encuentran las personas que no tienen capacidad de pago, es decir la población más vulnerable y pobre del país, allí los servicios de salud son financiados por una parte del dinero proveniente del RC y otras fuentes fiscales y parafiscales, cabe resaltar que todos los colombianos deben estar afiliados al SGSS. La afiliación al SGSS garantiza que todos los afiliados tendrán derecho a acceder a los servicios ofrecidos por el Plan Obligatorio de Salud (POS) que es el plan que integra todas las actividades tendientes a la protección de los afiliados en cuanto a enfermedades, promoción y fomento de la salud y la prevención, diagnóstico, tratamiento y rehabilitación para todas las patologías. La afiliación para poder acceder a los servicios ofrecidos por el POS bien sea del RC o del RS se realiza a través de las Empresas Promotoras de salud (EPS) que además de las afiliaciones son las encargadas del recaudo de las cotizaciones a través de la Administradora De los Recursos del Sistema General de Seguridad Social en Salud (ADRES) y garantizar las condiciones necesarias para la prestación del POS, la prestación de estos servicios se puede realizar directamente por las EPS o a través de Instituciones Prestadoras de Servicios (IPS), en ambos casos son los usuarios quienes eligen la entidad que les prestara los mencionados servicios (Ministerio de Salud y Protección Social, 2014).

La dirección del SGSS se encuentra bajo la dirección del Gobierno Nacional y del Ministerio de Salud, quienes son los encargados de atender las políticas, planes y programas orientados en la lucha contra las enfermedades y fomento de la educación.

El sistema cuenta también con vigilancia y control que son ejercidos por parte de la Superintendencia Nacional de Salud (SNS) entidad adscrita al Ministerio de Salud, la cual se encarga de la inspección, vigilancia y control en todos los niveles del SGSSS. Existen también otras entidades encargadas de vigilar y controlar algunos aspectos que tienen un impacto sobre la prestación de los servicios de salud, tal es el caso del Instituto Nacional de Salud (INS) encargado de la vigilancia y seguridad sanitaria así como del desarrollo y gestión del conocimiento en temas de salud, y el Instituto Nacional de Vigilancia de Medicamentos y Alimentos (INVIMA) cuyas funciones son la vigilancia, regulación,

inspección y el control de alimentos, medicamentos e insumos para la salud (Guerrero, Gallego, Becerril-Montekio, & Vásquez, 2011).

Si bien están establecidos los principios rectores del SGSSS desde hace un poco más de veinte años hoy en día se continúa fallando en varios aspectos, como la cobertura, la inviabilidad financiera, sobrecostos generados por la intermediación de las EPS (Ramos Mateus, 2013), otras falencias del sistema se ven reflejadas también en las cifras de inconformidad de los usuarios generada principalmente por los altos tiempos de espera en la asignación de citas médicas y atención de urgencias, dificultad de las poblaciones vulnerables para acceder a los servicios de salud, dificultad en el acceso a medicamentos, entre otras. Para el año 2015, según la encuesta de calidad de vida el 18,3% de la población opinó que el servicio de salud es de mala calidad.

Para comprender la razón por la cual no se ha logrado implementar en Colombia un eficiente Sistema de Salud algunos autores han intentado dar explicación a las fallas tanto en la fase de diseño como en la fase de implementación, en cuanto a la fase de diseño se plantea que los supuestos de crecimiento de la economía Colombiana que garantizarían el adecuado funcionamiento del sistema no se cumplieron, por el contrario, la economía Nacional tuvo una baja que generó que los índices de desempleo en el país aumentaran y con ello la cantidad de trabajadores cotizantes al régimen contributivo no llego a las cifras esperadas, esto genero un desequilibrio financiero del sistema. Otro hecho que da explicación a la deficiencia del sistema de salud es la corrupción (Ramos Mateus, 2013), ya que los dineros para la financiación del sistema pasan a través de una larga cadena de actores donde el dinero que sale del primer actor es mucho más del que llega al último actor de la cadena, lastimosamente esta corrupción no es castigada como debiera a pesar de que existen entidades encargadas de auditar el manejo de estos dineros. Otra razón es la homogenización que se ha realizado de todas las zonas del país, es decir, no se ha tenido en cuenta que cada región tiene unas necesidades diferentes y por ende la forma en la que se desarrolla e implementan las policitas de salud deben ser diferentes también (In, Disease, & Health, 2013), (Herazo Acuña, 2010).

4.1.1 Sistema de Salud en Colombia

Un sistema de salud, según la definición de la Organización Mundial de la Salud, es la suma de todas las organizaciones, instituciones y recursos cuyo objetivo principal consiste en mejorar la salud. Un sistema de salud necesita personal, financiación, información, suministros, transportes y comunicaciones, así como una orientación y una dirección general (OMS, 2005). El objetivo de los sistemas de salud es el cuidado de la salud (*Healthcare*) que está definido como el tratamiento y administración de enfermedades, así como la preservación de la salud a través de los servicios ofertados por médicos, odontólogos, farmaceutas, laboratorio clínico, enfermería y demás profesionales de la salud a través de bienes y servicios destinados a promover la salud tanto en cuidado preventivo, curativo y paliativo (Tien & Goldschmidt-Clermont, 2009).

Para entender el funcionamiento del Sistema de Salud es importante definir cuáles son los actores que lo componen. Según el Ministerio de Salud y Protección Social el SGSSS está compuesto por el Estado representado a través del Ministerio de Salud y Protección Social, las Entidades Promotoras de Salud (EPS) y finalmente las Instituciones Prestadores de Salud (IPS) dentro de los que se encuentran los hospitales, clínicas, centros médicos, laboratorios y demás entidades encargadas de prestar la atención a los usuarios. Se incluyen también entidades Territoriales y la Superintendencia Nacional de Salud (“Ministerio de Salud y Protección Social,” n.d.-a). A continuación, se describen más a profundidad cada uno de los actores.

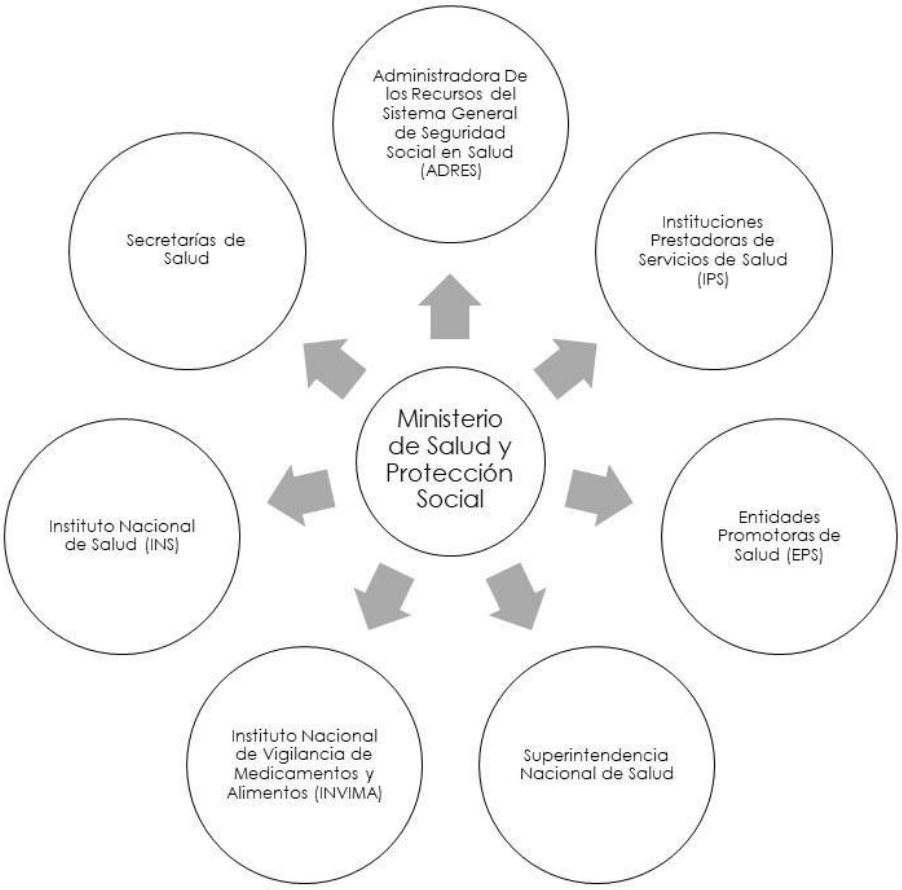


Ilustración 4 - Actores del SGSSS

4.1.2 Actores del Sistema General de Seguridad Social en Salud (SGSSS)

Ministerio de Salud y Protección Social

Dado que como lo indica en su nombre, el Ministerio tiene a cargo no solamente el sistema de salud, sino también el de protección social, para efectos del presente trabajo de investigación se hará referencia únicamente a las facultades referentes al Sistema de Salud. Su misión es la dirección del sistema de salud y protección social en salud, mediante la creación de políticas de promoción de la salud, prevención, tratamiento y rehabilitación

de enfermedades, así como la coordinación intersectorial para el desarrollo de políticas sobre los determinantes en salud, todo lo anterior bajo los principios de eficiencia, universalidad, solidaridad, equidad, sostenibilidad y calidad con el objetivo de contribuir al mejoramiento de la salud de los habitantes en Colombia ("Ministerio de Salud y Protección Social," n.d.-b).

El Decreto 4107 de 2011 establece los objetivos y las funciones del Ministerio, en cuanto a los primeros, es el encargado de la formulación, adopción, dirección, coordinación, ejecución y evaluación de la política pública en materia de salud, salud pública y promoción social en salud. En cuanto a las funciones, el decreto treinta y dos, las cuales pueden ser agrupadas de la siguiente manera:

- Formulación de política pública.
- Dirección, orientación, adopción y evaluación de planes y programas en materia de salud.
- Dirección de la vigilancia de salud pública.
- Procesos de investigación en materia de salud.
- Definición de requisitos para la habilitación y acreditación de EPS e IPS.
- Regulación de la oferta de servicios de salud.
- Gestión de recursos financieros.
- Creación de personas jurídicas para el apoyo al SGSSS.
- Administración de los sistemas de información del Sistema de Salud.

Administradora de los Recursos del Sistema General de Seguridad Social en Salud (ADRES)

Es una entidad adscrita al Ministerio de Salud, con personería jurídica, autonomía administrativa y financiera y patrimonio independiente. Fue creada con el fin de garantizar el adecuado flujo de recursos y realizar los respectivos controles. Dentro de los recursos que están bajo su administración están los que hacen parte del Fondo de Solidaridad y Garantías (Fosyga), los del Fondo de Salvamento y Garantías para el Sector Salud (FONSAET), los que financien el aseguramiento en salud, los copagos por concepto de prestaciones no incluidas en el plan de beneficios del Régimen Contributivo, los recursos

que se recauden como consecuencia de las gestiones que realiza la Unidad Administrativa Especial de Gestión Pensional y Contribuciones Parafiscales de la Protección Social (UGPP), bajo los principios de eficiencia, transparencia y calidad, con el fin de garantizar el adecuado flujo y los respectivos controles a los recursos en administración. Dentro de las funciones de la entidad se encuentran:

- Efectuar el reconocimiento y pago de las Unidades de Pago por Capitación – UPC (es el valor anual que se reconoce por cada uno de los afiliados al sistema general de seguridad social en salud para cubrir las prestaciones del Plan Obligatorio de Salud (POS) tanto en los regímenes contributivo como subsidiado) y demás recursos del aseguramiento obligatorio en salud.
- Realizar los giros a los prestadores de servicios de salud y proveedores de tecnologías en salud, de acuerdo con lo autorizado por el beneficiario de los recursos y adelantar las transferencias que correspondan a los diferentes agentes del sistema de tal manera que optimicen el flujo de recursos.
- Realizar las verificaciones para el reconocimiento y pago de prestaciones sociales.
- Comprar la cartera reconocida de Instituciones prestadoras de Servicios de Salud (IPS) con Empresas Promotoras de Salud (EPS).
- Administrar la Base de Datos Única de Afiliados (BDUA) que suministra la información para el reconocimiento de los pagos periódicos que se les hace a las EPS por aseguramiento en salud (ADRES, 2018).

Entidades Promotoras de Salud (EPS)

Según está definido en la Ley 100 de 1993 las entidades promotoras de salud son las encargadas de la afiliación, el registro de los afiliados y del recaudo de sus cotizaciones. Su función básica será organizar y garantizar, directa o indirectamente, la prestación del plan de salud obligatorio a los afiliados y girar a la entidad competente la diferencia entre los ingresos por las cotizaciones realizadas por los afiliados y el valor de las correspondientes unidades de pago por capitación. Dentro de las principales funciones de estas entidades se encuentran:

- Promover la afiliación de grupos de población no cubiertos actualmente por la seguridad social.
- Organizar la forma y mecanismos a través de los cuales los afiliados y sus familias puedan acceder a los servicios de salud en todo el territorio nacional.
- Definir procedimientos para garantizar el libre acceso de los afiliados y sus familias a las instituciones prestadoras con las cuales haya establecido convenios o contratos en su área de influencia o en cualquier lugar del territorio nacional, en caso de enfermedad del afiliado o su familia.
- Remitir al fondo de solidaridad y compensación la información relativa a la afiliación del trabajador y su familia, a las novedades laborales, a los recaudos por cotizaciones y a los desembolsos por el pago de la prestación de servicios.
- Establecer procedimientos para controlar la atención integral, eficiente, oportuna y de calidad en los servicios prestados por las instituciones prestadoras de servicios de salud.

Dado que cada EPS es una entidad autónoma, para establecer cuáles son los procesos que mayor impacto tienen sobre los usuarios del sistema de salud se revisó el informe del Sistema de evaluación y calificación de actores: Ranking de satisfacción EPS 2018 de la oficina de calidad del Ministerio de salud, donde se observa que la autorización para la entrega de medicamentos cubiertos por el plan de beneficios, autorización para cita médica especializada, autorización para radiografías e imágenes diagnósticas y la autorización para otros procedimientos equivalen al 80% de los trámites que con mayor frecuencia realizan los usuarios de las EPS, dentro de los otros trámites que ocupan el 20% restante se encuentran las afiliaciones, vinculaciones o desvinculaciones, tramitación de incapacidades, desafiliaciones, quejas, cambios de EPS, cambio de régimen, licencias de maternidad, reembolsos y pagos de moras. Dentro de los servicios que los usuarios de las EPS utilizan con mayor frecuencia se encuentra la consulta de medicina general, la entrega de medicamentos, los exámenes de laboratorio, odontología, urgencias, consulta ginecológica, otras consultas de medicina especializada, imágenes diagnósticas, programas de prevención y promoción, medicina interna, citas prioritarias o no programadas, hospitalización, pediatría, cirugía, terapias de diferentes índoles, obstetricia,

suministro de oxígeno, cuidado domiciliario y tratamientos asistidos (quimioterapia, radioterapia, diálisis) (Iglesias & Molina, 2018).

Instituciones Prestadoras de Servicios de Salud (IPS)

Según la resolución 1441 de 2013, las IPS están definidas como aquellas entidades cuyo objeto social es la prestación de servicios de salud y que se encuentran habilitadas de conformidad con el Sistema Obligatorio de Garantía de Calidad en Salud (SOGCS) que es el conjunto de instituciones, normas requisitos mecanismos y procesos que tienen por objetivo generar, mantener y mejorar la calidad de servicios de salud del país. En el artículo 185 de la Ley 100 de 1993, se establece que estas instituciones tienen autonomía administrativa, técnica y financiera.

Según lo reportado por el Ministerio de Salud en la base de datos de relación de IPS públicas y privadas según el nivel de atención y capacidad instalada al mes de enero de 2018 en Colombia en Colombia existían 3.711 IPS de las cuales el 35,1% pertenecen al sector público, el 64,4% al sector privado y tan solo el 0,46% es de naturaleza mixta (Ministerio de Salud y Protección Social, 2018b).

De las 3.711 IPS existentes en Colombia, solamente 44 de ellas cuentan con acreditación, esta certificación es concedida a las instituciones que de manera voluntaria implementan una serie de procesos, procedimientos y herramientas que garantizan niveles superiores de calidad respecto a los mínimos requeridos, de estas 44 entidades acreditadas 9 pertenecen al sector público, 34 al sector privado y 1 es de naturaleza mixta (Superintendencia Nacional de Salud, 2018). Como se mencionó estas entidades gozan de autonomía administrativa, técnica y financiera, razón por la cual, para identificar los procesos estratégicos, tácticos y operativos que son transversales en estas entidades, se seleccionaron 10 de las 44 IPS acreditadas (Tabla 2) y se realizó una revisión de los procesos estratégicos, tácticos y operativos, dado que en cada entidad los procesos tienen un nombre particular, se etiquetaron mediante palabras clave.

Entidad	Tipo
Centro dermatológico Federico Lleras	Público
Hospital civil de Ipiales	Público

Hospital Susana López Valencia	Público
Hospital Universitario Departamental de Nariño.	Público
Clínica del Country	Privado
Centro policlínico del Olaya	Privado
Clínica Universidad de la Sabana	Privado
Fundación Cardioinfantil	Privado
Javesalud	Privado
Hospital Infantil Universitario San José	Privado

Tabla 2 - IPS acreditadas seleccionadas para la identificación de procesos

Dentro de los procesos que son transversales a las IPS se encuentra que los procesos de cirugía, urgencias, terapia física, hospitalización, Unidad de Cuidados Intensivos (UCI), laboratorio clínico, parto y radiología se encuentran presentes en más de la mitad de las entidades consultadas. La tabla a continuación presenta cada uno de los procesos junto con la frecuencia y porcentaje obtenido de la muestra de 10 IPS.

PROCESO	FRECUENCIA	PORCENTAJE
Cirugía	11	100,00%
Urgencias	10	90,91%
Terapia física	9	81,82%
Hospitalización	8	72,73%
UCI	7	63,64%
Laboratorio clínico	8	72,73%
Parto	6	54,55%
Radiología	6	54,55%
Consulta externa	5	45,45%
Contabilidad y finanzas	5	45,45%
Diagnóstico	5	45,45%
Farmacia	5	45,45%
Gestión del talento humano	5	45,45%
Gestión de la información	4	36,36%
Gestión física	4	36,36%

Tabla 3 - Principales procesos de las IPS

Superintendencia Nacional de Salud

La entidad tiene por misión proteger los derechos de los usuarios del Sistema General de Seguridad Social en Salud mediante la inspección, vigilancia y control del aseguramiento en salud, promoviendo el mejoramiento de la calidad en atención en salud. Tiene asignadas 48 funciones principales que pueden ser resumidas como se muestra a continuación:

- Dirección, coordinación y ejecución de políticas de inspección, vigilancia y control del SGSSS.
- Ejercer la inspección, vigilancia y control de: cumplimiento de normas, riesgos del sistema, dinero que financia el sistema, sistemas de información relacionados con la salud, cumplimiento de principios universales del SGSSS, rendición de cuentas, sistemas de calidad, actividades de las compañías de seguros, rentas (provenientes del licor, tabaco y juegos de azar) y que van destinadas al sector salud y la ADRES.
- Vigilar el cumplimiento de los derechos de los usuarios en el SGSSS.
- Emitir instrucciones que faciliten el cumplimiento de las normas.
- Promocionar y desarrollar mecanismos de participación ciudadana.
- Establecer la idoneidad de los actores del SGSSS.
- Realizar los procedimientos de fusión, adquisición, liquidación, cesión de activos, pasivos y contratos, toma de posesión, etc. Que sean necesarias para garantizar la adecuada prestación de servicios de salud.
- Autorización de modificaciones en la estructura principal de los actores que se encuentran regulados.
- Reporte de irregularidades a las entidades competentes.
- Suspensión de los recursos de las entidades que el Ministerio de Salud indique.
- Sancionar el incumplimiento por parte de los sujetos vigilados de los indicadores de gestión establecidos.
- Autorizar traslados de afiliados al SGSSS a quienes se le han vulnerado sus derechos.
- Actuar como ente conciliador de los conflictos que surjan entre los actores del SGSSS.

Dentro de los procesos que maneja esta entidad se encuentran:

- Direccionamiento estratégico: se realiza la formulación, implementación y evaluación de las políticas institucionales, planes y programas, estudios y proyectos y el diseño e implementación de políticas, metodologías e instrumentos para la inspección, vigilancia y control.
- Protección a los usuarios y participación ciudadana: gestión de la participación ciudadana en las instituciones del SGSSS y gestión de atención al usuario del SGSSS.
- Inspección a sujetos vigilados del SGSSS: se realizan las auditorías a los sujetos vigilados y se identifican y realiza seguimiento a las liquidaciones voluntarias.
- Vigilancia a sujetos vigilados del SGSSS: Se realiza supervisión a los sujetos vigilados generando o modificando habilitaciones, así como la evaluación integral de los riesgos de los sujetos vigilados.
- Control a sujetos vigilados del SGSSS: Se realiza la evaluación y aprobación de acuerdos de reestructuración de pasivos y adopción y seguimiento de acciones y medidas especiales.
- Administración de justicia y resolución de conflictos dentro del SGSSS.
- Dentro de los procesos de apoyo se encuentra la gestión jurídica, la gestión financiera, la gestión de recursos físicos, la gestión de talento humano, la gestión documental, la gestión contractual, la gestión de TIC (Superintendencia Nacional de Salud, 2019).

Instituto Nacional de Salud (INS)

Según el Decreto Ley 4109 de 2011 el INS es la autoridad científico-técnica que tiene por objeto el desarrollo y la gestión del conocimiento científico en salud y biomedicina para contribuir a mejorar las condiciones de salud de las personas, también realiza investigación científica básica y aplicada en salud y biomedicina, promueve la investigación científica, la innovación y la formulación de estudios de acuerdo con las prioridades de salud pública. El decreto le asigna 23 funciones principales dentro de las cuales destacan:

- Actuar como entidad referencia nacional en salud pública y coordinar las redes de vigilancia epidemiológica, laboratorios, donación y trasplante de órganos y tejidos, banco de sangre y servicios de transfusión.
- Operar y desarrollar el sistema de vigilancia y control en salud pública.

- Desarrollar, producir o comercializar directamente o mediante alianzas estratégicas, bienes y servicios de interés en salud pública.
- Promover, orientar, coordinar y ejecutar investigaciones en salud pública.
- Analizar información sobre la situación de salud de la población colombiana para desarrollar propuestas de política para la toma de decisiones.
- Crear y articular una red de centros de investigación científico-técnicos en materia de salud pública.
- Ejercer las funciones de Observación Nacional de Salud.
- Emitir conceptos sobre clasificación toxicológica y evaluación de riesgo de plaguicidas.
- Formular, proponer y controlar la ejecución de programas de prevención, promoción y protección de la salud pública.
- Diagnosticar, coordinar y articular los riesgos a la salud pública.
- Participar en el diseño y ejecución de programas destinados a prevenir, reducir o atender los efectos sobre la salud producidos por desastres, calamidades o emergencias (Instituto Nacional de Salud, 2011).

Secretarías de Salud

Según la base de datos manejada por el Ministerio de salud a través de la plataforma datos abiertos actualizados a junio de 2017 existían en Colombia 24 secretarias de salud. Para identificar el objeto y las funciones de estas entidades, se realizó una revisión del sitio web de 17 secretarias de salud de diferentes departamentos de Colombia (Ministerio de Salud y Protección Social, 2018a), y de esta manera, se logró establecer que estas entidades tienen como misión la mejora de la calidad de vida y salud de la población que habita bajo su jurisdicción, así como realizar las actividades de vigilancia y control de los servicios de salud, en cuanto a las funciones que son transversales a estas instituciones a lo largo del territorio Colombiano, se encuentran:

- Garantizar el cumplimiento de los principios rectores del SGSSS.
- Dirigir los procesos de inspección, vigilancia y control de lo definido por el Ministerio de Salud.
- Dirigir los procesos de asesoría de todos los actores del SGSSS a nivel departamental.

- Formular, ejecutar y evaluar planes, programas, políticas y proyectos en salud.
- Adoptar, difundir y ejecutar la política de salud pública.
- Gestionar y supervisar el acceso a la prestación de servicios de salud a la población.
- Gestionar el recaudo, flujo y ejecución de recursos para la financiación de proyectos de salud.
- Desarrollar mecanismos para la participación social.
- Realizar la gestión integral de la información relacionada con el sistema de salud.
- Desarrollar e implementar acciones de inspección, vigilancia y control de los factores de riesgo del ambiente que afecten la salud como lo es el control de vectores.
- Vigilar y controlar la distribución y comercialización de alimentos, así como el funcionamiento de establecimientos gastronómicos y del transporte de alimentos.
- Vigilar y controlar junto con el INVIMA y con el Fondo Nacional de Estupefacientes la producción y distribución de medicamentos.
- Organizar y controlar la red de IPS.
- Formular, dirigir la política de implementación del Régimen Subsidiado del Departamento.
- Elaborar el presupuesto en función de los planes, programas y proyectos de salud.
- Emitir concepto técnico y autorización en la expedición de Tarjetas Profesionales de las personas que lo requieran.

Instituto Nacional de Vigilancia de Medicamentos y Alimentos (INVIMA)

Esta entidad tiene por misión proteger y promover la salud de la población, mediante la gestión del riesgo asociada al consumo y uso de alimentos, medicamentos, dispositivos médicos y otros productos objeto de vigilancia sanitaria. Dentro de sus funciones generales se encuentran:

- Ejercer las funciones de inspección, vigilancia y control a los establecimientos productores y comercializadores de medicamentos, productos biológicos, alimentos, bebidas, cosméticos, dispositivos y elementos médico-quirúrgicos, odontológicos, productos naturales homeopáticos y los generados por biotecnología, reactivos de diagnóstico, y otros que puedan tener impacto en la salud individual y colectiva.

- Certificar las buenas prácticas y condiciones sanitarias de los productores de los artículos mencionados anteriormente, además de expedir, renovar, ampliar, modificar y cancelar registros sanitarios.
- Identificar, evaluar y sancionar infracciones a las normas sanitarias que sean de su competencia e informar a la entidad competente en caso de que no la tenga.
- Elaboración de directrices, procedimientos y normas técnicas en temas que son competencia de la entidad.
- Brindar asistencia a las entidades en la aplicación de normas y procedimientos en cuanto a vigilancia sanitaria.
- Dirigir y hacer cumplir en todo el país las funciones de control de calidad y vigilancia sanitaria de los productos de su competencia.
- Realizar control sanitario sobre la publicidad de los productos de su competencia.
- Realizar actividades de información y coordinación con los productores y comercializadores, sobre el cuidado en el manejo y uso de los productos de su competencia.
- Adelantar campañas de educación sanitaria con los consumidores.
- Desarrollar un sistema de automatización y verificación internacional para productos objeto de vigilancia.
- Otorgar el visto bueno sanitario a la importación y exportación de los productos de su competencia (INVIMA, 2011a).

Dentro de sus macroprocesos se encuentran:

- Gestión directiva: dirección de la gestión integral a través de la definición y seguimiento de directrices y estrategias que permitan el cumplimiento de la misión y visión.
- Atención integral al ciudadano: suministrar a los usuarios y ciudadanía en general, atención e información oportuna en cuanto a trámites y servicios que presta la entidad.
- Aseguramiento sanitario: adelantar las actividades relacionadas con registros sanitarios, auditorías y certificaciones y educación sanitaria y asistencia técnica asociada a los productos competencia del INVIMA.
- Inspección, vigilancia y control sanitario: realizar la planeación, ejecución y evaluación de las actividades de inspección, vigilancia y control y temas asociados, así como el

control de calidad de los productos competencia basadas en un enfoque de riesgo con el propósito de garantizar el cumplimiento de los requisitos sanitarios establecidos.

- Procesos de apoyo como gestión del talento humano, gestión financiera y presupuestal, gestión administrativa, gestión jurídica, gestión de TIC y administración del Sistema de Gestión Integrado (INVIMA, 2011b).

4.1.3 Niveles de decisión del Sistema de salud

El proceso de toma de decisiones en el Sistema de Salud se lleva a cabo desde tres niveles: estratégico, táctico y operativo. Las decisiones estratégicas están relacionadas con los objetivos a largo plazo y la definición de las funciones, actividades y en general los elementos que conforman el Sistema de Salud, las decisiones tácticas están enfocadas a las decisiones del mediano plazo y la definición de programas, finalmente las decisiones operativas están más enfocadas en el uso de los recursos para transformarlos en productos o para el caso de la presente investigación en prestación de los servicios de salud (Cuervo García, 1975).



Ilustración 5 - Niveles de decisión

4.1.3.1 Nivel estratégico

En este nivel se toman las decisiones que definen los objetivos del SGSSS y las acciones que se deben seguir para lograrlos. Las decisiones estratégicas están a cargo del Gobierno representado por el Ministerio de Salud y Protección Social pues son los responsables de

la creación e implementación de las políticas que dirigen el funcionamiento del Sistema de Salud Colombiano.

4.1.3.2 Nivel táctico

Las decisiones de tipo táctico son tomadas por las Entidades Promotoras de Servicios de Salud (EPS) y son aquellas que permiten materializar las estrategias definidas en el nivel estratégico a través de la gestión de los recursos monetarios y administrativos.

4.1.3.3 Nivel operativo

Las decisiones operativas son tomadas por las Instituciones Prestadoras de Servicios (IPS) que mediante la gestión de recursos realizada por las EPS y los lineamientos emitidos por el MinSalud ejecuta las acciones necesarias para entregar servicios de salud a los Colombianos.

4.1.4 Campos de aplicación del Sistema de salud

Se presentan dos campos de aplicación para cada uno de los niveles de decisión revisados en el numeral anterior: la planeación y el control, a continuación, se describe cada uno de los campos considerados dentro del SBR:

4.1.4.1 Planeación estratégica

La planeación estratégica contempla las actividades relacionadas con la toma de decisiones por parte del Gobierno Nacional que permitirán alcanzar un futuro deseado. Algunas de las actividades que se contemplan son la planeación de recaudo de fondos, la planeación de la infraestructura necesaria para la prestación de servicios de salud a nivel Nacional, evaluación de la efectividad de medidas para el tratamiento de enfermedades, planeación del uso de recursos, evaluación de la efectividad de medidas de promoción y prevención, planeación de asequibilidad al sistema de salud, planeación de medidas para el aumento en la calidad y la esperanza de vida.

4.1.4.2 Control estratégico

El control estratégico incluye aquellas actividades o decisiones tomadas por el gobierno que buscan validar los resultados o el desempeño de decisiones o estrategias implementadas con anterioridad, dentro de este campo se encuentra el control del costo-efectividad de

medidas de prevención, estudio de la propagación de enfermedades con tratamiento, evaluación del control de factores de riesgo, control de proveedores de servicios de salud, la evaluación del impacto de medidas que favorecen la salud, etc.

4.1.4.3 Planeación táctica

La planeación táctica se enfoca en aquellas acciones que soportan la toma decisiones por parte de las EPS para alcanzar las metas o los propósitos planteados, algunas de las actividades contempladas en el campo son: la selección de EPS por parte de los usuarios de los servicios de salud, la planeación de costos de operación de las EPS, la planeación para la maximización de la utilidad, la planeación considerando el costo-efectividad de medidas para diagnosticar o tratar enfermedades, planeación de rutas clínicas de atención de enfermedades o accidentes, la planeación de la asignación de citas médicas, etc.

4.1.4.4 Control táctico

En el control táctico se plantean actividades enfocadas a identificar mejoras a la prestación de servicios de salud.

4.1.4.5 Programación

La programación hace referencia a aquellas actividades a través de las cuales las IPS planifican los recursos y el uso de los mismos en el futuro, dentro de este campo se abordan temas como: la evaluación costo-efectividad de tratamientos, el costeo de la programación de los pacientes en las diferentes facilidades, la programación de servicios, el diseño de rutas de atención, la planeación de la capacidad de las unidades de atención, la ubicación de las facilidades, la programación de la capacidad del personal médico, la progresión de enfermedades o infecciones, el impacto de la programación de servicios médicos sobre la calidad.

4.1.4.6 Control operativo

El control operativo aborda actividades que buscan evaluar los resultados de decisiones o acciones ejecutadas por las IPS, por ejemplo, la evaluación del costo de la programación de las operaciones, la evaluación del acceso a las facilidades de salud, la identificación de los cuellos de botella del sistema, la conveniencia de la ubicación de nuevas facilidades, etc.

4.1.5 Áreas de aplicación del Sistema de salud

Las áreas de aplicación son transversales a todos los campos y hacen referencia a las categorías en las que se pueden clasificar los problemas de los diferentes actores del Sistema de Salud, estas áreas incluyen:

4.1.5.1 Financiero

En esta área se incluyen problemáticas relacionadas con las finanzas de los actores, por ejemplo, la evaluación de rentabilidades de diferentes estrategias o escenarios de operación, la evaluación costo-oportunidad, costo de las soluciones, recaudo de recursos, uso de recursos monetarios, maximización de la utilidad de las organizaciones de salud.

4.1.5.2 Operaciones

Las operaciones abarcan problemáticas relacionadas con las actividades misionales del actor, por ejemplo, el uso de recursos físicos, diseño de rutas de atención, planeación de recursos, evaluación de programas de atención, diseño de rutas clínicas.

4.1.5.3 Recursos humanos

El área de recursos humanos aborda problemáticas relacionadas con la gestión de la plantilla de fuerza laboral que permite la operación de las actividades de los actores, algunas problemáticas abordadas en esta área son, por ejemplo, el requerimiento de personal, la programación de turnos del personal de salud.

4.1.5.4 Promoción

Esta área incluye aquellas problemáticas relacionadas con las actividades que tienen por objetivo fomentar el control de la salud de las personas, se tratan actividades como el diseño y/o evaluación de la efectividad de las medidas de promoción.

* Definición de Promoción de la OMS: La promoción de la salud permite que las personas tengan un mayor control de su propia salud. Abarca una amplia gama de intervenciones sociales y ambientales destinadas a beneficiar y proteger la salud y la calidad de vida individuales mediante la prevención y solución de las causas primordiales de los problemas de salud, y no centrándose únicamente en el tratamiento y la curación.

4.1.5.5 Prevención

El área de prevención contempla aquellas problemáticas relacionadas con las actividades que tienen por objeto la prevención de aparición de enfermedades o detener el avance de las mismas; algunos problemáticas abordadas son, por ejemplo, la evaluación de la efectividad de las medidas de prevención de enfermedades, el estudio de la propagación de enfermedades frente a las medidas de prevención, la progresión de las enfermedades frente a tratamientos.

* Definición de Prevención de la OMS: "Medidas destinadas no solamente a prevenir la aparición de la enfermedad, tales como la reducción de factores de riesgo, sino también a detener su avance y atenuar sus consecuencias una vez establecida".

4.1.5.6 Calidad

La calidad aborda problemas relacionados con las variables que afectan los beneficios percibidos por los ciudadanos producto de recibir servicios de salud, por ejemplo, la asequibilidad al sistema de salud, el aumento en la calidad y esperanza de vida asociado al padecimiento de enfermedades, el control de factores de riesgo, el impacto de la programación de los servicios médicos sobre la calidad.

4.1.5.7 Logística

El área de la logística incluye problemas relacionados con la gestión de recursos como la utilización de ambulancias, ubicación geográfica de nuevas facilidades de salud, diseño de redes de atención domiciliaria, definición de la ubicación de departamentos hospitalarios.

4.2 MARCO TEÓRICO (ADQUISICIÓN DEL CONOCIMIENTO)

4.2.1 Revisión de literatura

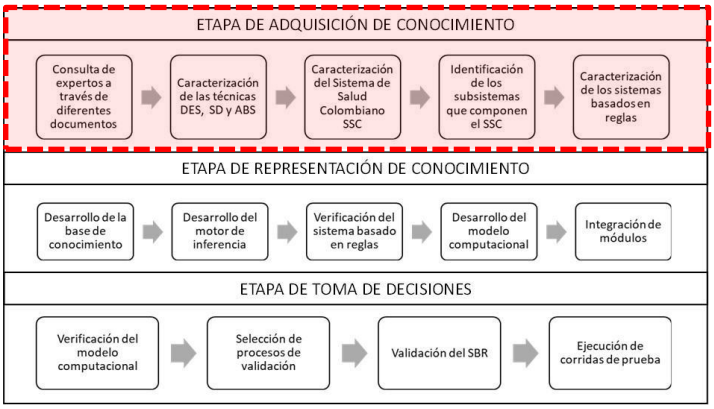


Ilustración 6 - Etapa adquisición de conocimiento

La primera fase de la metodología utilizada es la adquisición de conocimiento, para esto se define como problema de interés la deficiente gestión de los diferentes actores del sistema de salud y que requiere de una permanente mejora para satisfacer las necesidades de la población colombiana; por la complejidad del sistema se sabe que las técnicas de simulación aplicadas tanto individual como combinadas han permitido abordar estas problemáticas. No obstante, al analista/modelador se enfrenta al reto de decidir cual o cuales técnicas emplear por lo tanto se debe decidir qué técnica de simulación utilizar para modelar el comportamiento de los diferentes sistemas garantizando que la misma generara una alta verosimilitud con el modelo real y que en términos de utilización de recursos sea eficiente. Para ello se seleccionaron los manejadores bibliográfico de SCOPUS y SPRINGER en el periodo comprendido 2018 hacia atrás. En el primer buscador se trabajó con una ecuación de búsqueda de:

TITLE-ABS-KEY (Simulation OR modeling) AND TITLE-ABS-KEY (healthcare OR healthcare OR health AND care)

De este proceso se obtiene un resultado de 922 documentos mientras que para Springer se utilizó la siguiente ecuación:

(Simulation OR modeling OR modelling) AND (healthcare OR health-care OR health AND care)

De este proceso se obtiene un resultado de 464 artículos, para un total de 1.386 artículos. Posteriormente, se realiza una segunda revisión en aras de actualizar la base de conocimiento (resivisión de los años 2018 a 2021), la búsqueda se realiza en los gestores bibliográficos ScienceDirect donde se utilizaron las siguientes ecuaciones de búsqueda:

healthcare OR health care AND discrete event simulation

y

healthcare OR health care AND System dynamic AND simulation

De esta búsqueda se extrajeron 53 papers adicionales, para un total de 1.439 de los cuales 1.007 fueron utilizados para el entrenamiento del árbol de decisión y 432 para su evaluación, proceso que se presentará más adelante.

En cuanto al uso general de las técnicas de simulación en los artículos que conforman la base de conocimiento, el 76% de los problemas son modelados mediante DES, el 13% de los artículos utilizan ABS y el restante 12% utiliza SD, esto refleja que la Simulación de Eventos Discretos es la técnica más utilizada al momento de abordar los problemas del sector salud mediante técnicas de simulación.

Ahora, en cuanto a los niveles de decisión en los que se clasifican los problemas de los diferentes actores, el 70,3% de los problemas abordados por el gobierno corresponden a la planeación estratégica, lo cual está alineado con la naturaleza de las funciones que cumple este actor. En cuanto a las EPS los problemas abordados a través de simulación están distribuidos en un 44% hacia la planeación táctica y un 56% hacia el control táctico en línea con el carácter de hacedor de planes y control, especialmente en el uso de los recursos que tienen las EPS, finalmente, en cuanto a las IPS la participación que tiene cada campo de aplicación del 51% en la programación de recursos y el 49% al control operativo, reflejado en el seguimiento a los resultados y rendimiento de los procesos prestados.



Ilustración 7 - Campos de aplicación por actor

En cuanto al uso de las técnicas de simulación utilizadas por nivel de decisión, se puede observar que DES es la más usada para los tres niveles de decisión, con un 58% para los problemas estratégicos, el 78% para los problemas tácticos y el 85% para los problemas de carácter operativo. La dinámica de sistemas es usada en mayor proporción dentro de los problemas de tipo estratégico con un 22% y ABS es utilizada con una mayor participación dentro de los problemas de nivel táctico.

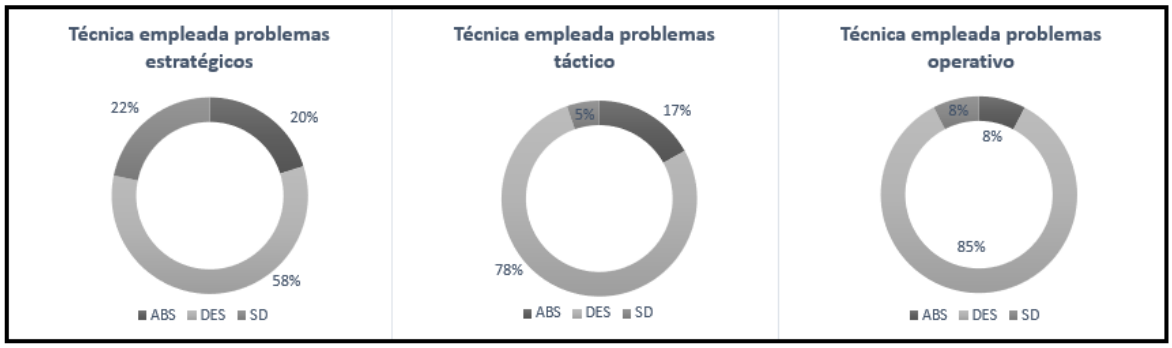


Ilustración 8 - Técnicas de simulación empleadas por nivel de decisión

Finalmente, la Ilustración 9 presenta la participación porcentual que tienen los campos de aplicación en los que se pueden clasificar los problemas del sector salud en cada una de las tres técnicas de simulación, de esta manera se encuentra que dentro de los problemas abordados mediante ABS el 55% corresponde a la simulación de problemas relacionados con la programación, seguido de la planeación táctica con el 20%. En cuanto a DES el 34% de los artículos que utilizaron está técnica de simulación corresponde al modelado de problemas de control operativo, seguido del 33% que corresponde a programación.

Finalmente, la Dinámica de Sistemas es utilizada en un 53% para modelar problemas de planeación estratégica, seguido del 22% correspondiente a control operativo.

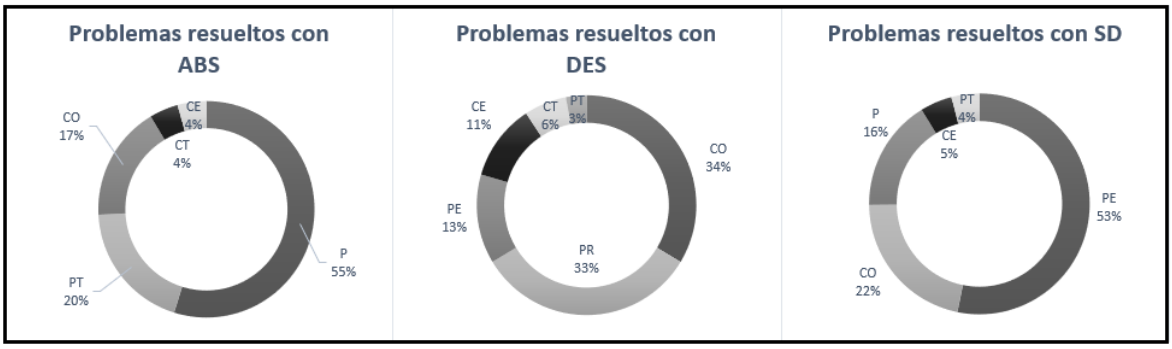


Ilustración 9 - Técnicas utilizadas por campo de aplicación

4.2.2 Técnicas de simulación

4.2.2.1 Generalidades

La simulación es la imitación de la operación de los procesos del mundo real o de sistemas a través del tiempo, la simulación involucra la generación de una historia artificial del sistema y la observación de esa historia artificial para dibujar inferencias concernientes a las características de operación del sistema real. Esta imitación se realiza a través de un modelo de simulación, el cual luego de ser validado puede ser usado para investigar las múltiples opciones de "qué pasaría si…" y estudiar los cambios potenciales del sistema bien sea mediante análisis aguas arriba o aguas abajo y mediante este mundo virtual se puede someter el sistema a condiciones extremas, relajar restricciones, lo cual no es posible en el mundo real (Marshall, Burgos-liz, Eng, Ijzerman, Osgood, et al., 2015). La simulación tiene consigo tanto ventajas como desventajas, en cuanto a las primeras permite realizar la evaluación de políticas o realizar cambios en el sistema simulado sin necesidad de afectar el sistema real, el tiempo en el que desarrolla la simulación es mucho más corto que el tiempo del sistema real, lo que permite observar cambios en periodos de tiempo mucho más cortos, permite evidenciar la interacción entre las variables y la relevancia de cada una dentro del sistema; en cuanto a las segundas es una técnica que requiere entrenamiento especial por parte del modelador (Banks, 2005), además que los requerimientos de información para los modelos pueden ser difíciles de encontrar en términos de costo y/o

disponibilidad (Marshall, Burgos-liz, Eng, Ijzerman, Osgood, et al., 2015). La Ilustración 10 - Pasos en un estudio de simulación (Banks, 2005) muestra los pasos guía para construir un modelo de simulación, los pasos se describen a continuación:

1. Formulación del problema: Es importante que tanto los hacedores de políticas como los analistas comprendan y estén de acuerdo con la formulación del problema, en algunas ocasiones el problema debe ser reformulado durante el desarrollo del estudio.
2. Ajuste de objetivos y plan general del proyecto: Se deben establecer las preguntas que se espera resolver mediante la simulación. También es necesario establecer el personal requerido, el costo del estudio, el tiempo que tardará el estudio y los demás recursos.
3. Conceptualización del modelo: Se debe realizar la abstracción de las características esenciales del problema, lo mejor es iniciar con un modelo básico y al ir avanzando en el modelado se va enriqueciendo el modelo de tal manera que no se aumente innecesariamente la complejidad del modelo.
4. Recolección de datos: Los objetivos planteados en el estudio son los que indican qué datos son requeridos, esta etapa del proceso suele tomar gran parte del tiempo total requerido para el estudio.
5. Traducción del modelo: El modelo requiere programación y almacenamiento de información, por lo cual debe ser introducido en un formato reconocido computacionalmente, es decir un software.
6. ¿Verificado?: La verificación pertenece al lenguaje de programación utilizado para la traducción del modelo, allí se revisa que el mismo sea apropiado, que tenga una estructura lógica correcta y que los parámetros y estructuras lógicas se encuentren correctamente representados.
7. ¿Validado?: usualmente se logra a través de la calibración del modelo, es un proceso iterativo de comparar el modelo con el sistema real y según los resultados obtenidos mejorar el modelo, el proceso se debe repetir hasta obtener una precisión aceptable.
8. Diseño experimental: se deben representar las situaciones alternas que se desean analizar, también se debe determinar el número de réplicas, el periodo de iniciación, y tiempo de cada réplica para cada escenario.
9. Corridas y análisis: la ejecución de corridas y su correspondiente análisis se usan para estimar las medidas de desempeño del sistema.

10. ¿Más corridas?: En base a los resultados obtenidos en el punto anterior se establece si es necesario realizar más réplicas del modelo de simulación.
11. Documentación y reporte: Existen dos tipos de documentación, del programa y del proceso. La primera es la que permite a otras personas entender y operar el programa, la segunda es necesaria para mostrar claramente los resultados obtenidos mediante el desarrollo del estudio.
12. Implementación: Este paso depende de qué tan bien se llevaron a cabo los 11 pasos anteriores, si el usuario del modelo comprende la naturaleza del modelo y sus salidas, la probabilidad de que realice una buena implementación es alta (Banks, 2005).

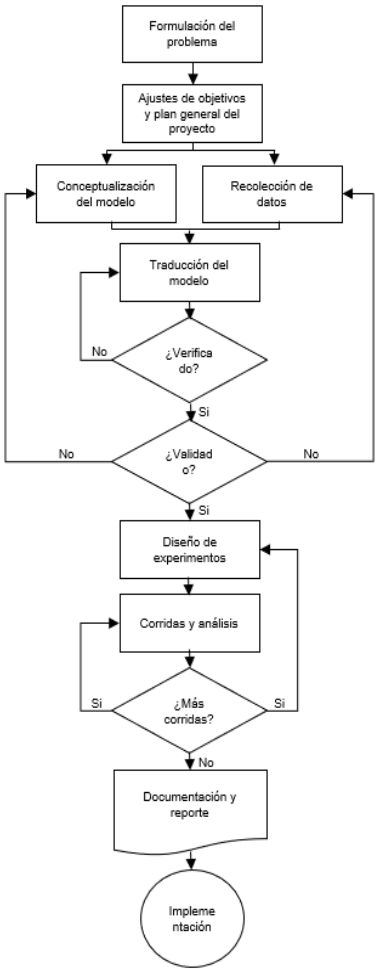


Ilustración 10 - Pasos en un estudio de simulación (Banks, 2005)

4.2.2.2 Simulación de eventos discretos

Un sistema puede ser categorizado como discreto cuando una de sus variables de estado cambia únicamente en un conjunto de puntos discretos en el tiempo (Banks, 2005). La simulación de eventos discretos (DES por sus siglas en inglés Discrete Event Simulation) es una herramienta para la evaluación y análisis de desempeño de sistemas complejos, cuyo comportamiento no puede establecerse con exactitud, pero que se puede describir usando modelos de probabilidad y estadística (Mendez G., Álvarez P., Centeno, & Baesler A., 2015).

Este método es ampliamente utilizado para caracterizar y analizar procesos de colas y redes de colas en las cuales hay un énfasis en el uso de recursos. Los elementos principales de DES son:

- Los eventos: es algo que ocurre en un instante determinado de tiempo y puede afectar los recursos y/o las entidades.
- Entidades: son objetos que tienen atributos y consumen recursos mientras experimentan eventos, pero, el consumo no es afectado por el nivel de su comportamiento individual.
- Atributos: son características únicas de una entidad, puede o no que cambien con el paso del tiempo.
- Recursos: son objetos que proveen un servicio a una entidad.

Las salidas de DES pueden ser interpretadas o usadas como indicadores del tipo utilización de recursos, tiempos de espera, número de entidades en cola y salida de servicios o productos (Marshall, Burgos-liz, Eng, Ijzerman, Osgood, et al., 2015).

4.2.2.3 Dinámica de sistemas

La complejidad dinámica surge porque los sistemas están sometidos a constantes cambios, están poco acoplados ya permanentemente experimentan fuertes interacciones entre ellos, se presentan ciclos de retroalimentación, se caracterizan por tener relaciones no lineales, su presente está determinado por su historia, son sistemas autoorganizados, adaptativos, en los que se presentan trade-offs y son resistentes a los cambios (Sterman, 2014).

La dinámica de sistemas (SD por sus siglas en inglés System Dynamics) es un método para mejorar el aprendizaje de sistemas complejos que nos ayuda a entender la complejidad del sistema. La SD se basa en teorías no lineales y control de los ciclos de retroalimentación (Sterman J. D., 2000). Esta técnica pretende predecir estados futuros de fenómenos a través del uso de ecuaciones diferenciales, dicha predicción se realiza de manera generalizada y el punto central de la técnica es la identificación de las relaciones existentes entre los elementos que conforman el sistema, esto permite explicar de manera más sencilla los comportamientos globales del sistema y también las acciones que se deben tomar para modificar el comportamiento del sistema (Izquierdo, Luis R.; Galán, José M.; Santos, José I.; Del Olmo, 2008).

Uno de los supuestos de SD es que el comportamiento del sistema se debe a su estructura y no a fuerzas externas. SD puede generar patrones y tendencias como valores medios como salidas del modelo. Se pueden analizar las salidas a través de la experimentación de diferentes políticas, la SD se caracteriza por manejar un alto nivel de agregación, por lo general esta técnica es utilizada para reconocer el comportamiento de patrones en los sistemas (Marshall, Burgos-liz, Eng, Ijzerman, Osgood, et al., 2015). Los elementos principales de SD son:

- Retroalimentación: Los resultados de las acciones definen la situación que se presentará en el futuro, esa nueva situación futura altera la evaluación del problema y por ende las decisiones que se tomarán.
- Acumulación (stocks): son acumulaciones o agregaciones de algo.
- Tasas (flujos): son las que generan el ingreso o la salida de los stocks y tienen por unidades las mismas de los stocks por unidad de tiempo.
- Tiempos de demoras: Es el tiempo que transcurre entre el momento en el que se toma una decisión y el momento en el que se genera un efecto sobre el sistema (Sterman, 2014).

4.2.2.4 Simulación basada en agentes

Con el objetivo de modelar los Sistemas adaptativos complejos surge la Simulación Basada en Agentes (SBA), una técnica que permite representar los comportamientos emergentes del funcionamiento u operación de los agentes (fenómenos del tipo bottom up), se pueden

modelar agentes con comportamientos heterogéneos a la vez que se maneja racionalidad y conocimiento limitado de los agentes. La técnica permite observar el comportamiento agregado de los agentes del sistema y además analizar el comportamiento individual de cada uno de los agentes, es decir que permite fácilmente cambiar el nivel de análisis de un nivel macro a un nivel micro y viceversa. Dentro de las limitaciones de la técnica está el hecho de que es difícil validar (que el modelo represente adecuadamente el sistema real) (Quezada & Canesa, 2010). Esta técnica ha sido ampliamente utilizada en el campo de la física y las ciencias naturales, pero recientemente se ha comenzado a utilizar en las ciencias sociales, pues permite observar cómo emergen las estructuras sociales a partir de las acciones individuales y la forma en la que los individuos son afectados por dichas estructuras (García-Valdecasas Medina, 2011).

Los elementos principales son:

- Agentes: caracterizados por ser autónomos y estar en constante interacción, sus acciones dependen del estado recurrente de su contexto, además actúa según reglas de decisión definidas, los agentes pueden aprender y adaptarse en base a su experiencia.
- Dinámica: tanto los agentes como su ambiente pueden cambiar, desarrollarse o evolucionar a través del tiempo.
- Estructura: esta estructura es emergente, dicha emergencia depende de las interacciones de loa gentes (Marshall, Burgos-liz, Eng, Ijzerman, Osgood, et al., 2015).

4.2.3 Sistemas de soporte a la decisión

4.2.3.1 Sistemas de información

Las finalidades de los sistemas de información como las de cualquier otro sistema, son procesar entradas, mantener archivos de datos relacionados con el sistema y producir información, reportes y otras salidas (Senn, 1992). Los sistemas de información se desarrollan con diversos propósitos, según las necesidades del sistema (Kendall & Kendall, 2005).

Categorías de sistemas de información:

- Sistemas para el procesamiento de transacciones: son sistemas de información computarizados creados para procesar grandes cantidades datos relacionados con las transacciones rutinarias de los sistemas y de esta manera realizar una mejora en el procesamiento de las mismas, las transacciones son aquellos sucesos o actividades que afectan todo el sistema.
- Sistemas de información administrativa: este tipo de sistemas ayuda a los directivos a tomar decisiones y resolver problemas, están diseñados para que de forma periódica puedan preparar reportes de la información almacenada para el soporte de decisiones. Es decir que se presenta la información mediante forma y formatos diseñados con anterioridad.
- Sistemas para el soporte de decisiones: en el siguiente numeral se abordan este tipo de sistemas.

4.2.3.2 Sistemas de soporte a la decisión

Qué son los Sistemas de Soporte a la Decisión

Existen decisiones que no son de naturaleza recurrente, sino que se toman de forma esporádica, este tipo de decisiones suelen ser de naturaleza no estructurada o semiestructurada, que se caracterizan por no tener procedimientos claros para tomarlas y tampoco es posible identificar con anticipación todos los factores que deben considerarse en la decisión (Senn, 1992), para soportar la toma de decisiones que están enmarcadas en estas características surgieron los Sistemas de Soporte a la Decisión. Un Sistema de Soporte a las Decisiones (DSS por sus siglas en inglés) es un sistema de computación que soporta la selección mediante una asistencia al tomador de decisiones en la organización de la información y el modelado de las salidas (Sauter, 2010). A comienzos de los años 70 Scott Morton articuló uno de los mayores conceptos de DSS como “Un sistema interactivo basado en computador, el cual ayuda a los tomadores de decisiones a utilizar información y modelos para solucionar problemas no estructurados”. Desde esta década han sido múltiples las definiciones de este tipo de sistemas sin llegar a un consenso, sin embargo Alexander resalta algunos elementos comunes en este tipo de sistemas, el primero de ellos es la estructura del problema que se enfoca en el grado en el que la situación que requiere

tomar una decisión muestra características de certeza, el segundo elemento es la centralización de las salidas de la decisión, es decir la efectividad de la decisión o el grado en el cual la decisión es exitosa teniendo en cuenta los objetivos que se buscan, un tercer elemento está relacionado con la responsabilidad última que recae sobre un actor de tomar la decisión final, esto resalta que los DSS proveen soporte para la toma de una decisión pero es en definitiva responsabilidad del usuario final la toma de la decisión y el control de la misma (Senn, 1992) (Kendall & Kendall, 2005). Basado en estos tres elementos, se define un DSS como "un sistema bajo el control de uno o más tomadores de decisión que asiste en la actividad de toma de decisiones mediante un conjunto organizado de herramientas intentando imponer estructura en porciones de la situación de toma de decisión para mejorarla efectividad de la salida generada por la decisión".

Estos sistemas aumentan la habilidad del tomador de decisiones de procesar información y conocimiento sobre problemas complejos que requieren bastante tiempo, lo que a su vez genera una disminución de los tiempos asociados a la toma de decisión, aportan también un grado de confianza a la decisión tomada, sin embargo, se debe tener presente que estas decisiones no son tomadas teniendo en cuenta habilidades humanas como la creatividad, la intuición o la imaginación (Alexander, 2004).

Componentes de un Sistema de Soporte a la Decisión

- Sistema de administración de bases de datos *(Database management system - DBMS)*: incluye la base de datos que contiene los datos relevantes sobre la situación problema (Turban, Aronson, & Liang, 2005), además provee accedo y control a dichos datos a través de programas de tal manera que se acceda de manera apropiada para el fácil análisis por parte del usuario (Sauter, 2010). En pocas palabras, realiza la recuperación, almacenamiento y organización de la información relevante de un contexto particular de decisión (Alexander, 2004).
- Sistema de gestión del modelo base *(Model base management system - MBMS)*: realiza la ejecución y control de las actividades asociadas con los modelos cuantitativos que proveen capacidades analíticas a los DSS (Alexander, 2004).

- Interfaz de usuario *(User interface):* es el mecanismo por el cual la información es ingresada al sistema y entregada del sistema (Sauter, 2010), es decir el subsistema a través del cual se comunica con el DSS.

Base de conocimiento de un DSS

Allí el conocimiento es almacenado, por conocimiento se hace referencia a las reglas, heurísticas, límites, restricciones, salidas previas y cualquier otra información que pueda ser programada en el DSS, la información de la base de conocimiento es generalmente el domino específico del problema. La base contiene todo tipo de conocimiento como descripciones de objetos o entidades y sus relaciones, descripción de varias estrategias o comportamientos para la resolución de problemas, restricciones, probabilidad, etc. El conocimiento contenido en la base puede ser categorizado en dos grupos, hechos que representan lo que se conoce como verdad y las hipótesis que representan las reglas o relaciones que se creen existen (Alexander, 2004).

Tipos de Sistemas de Soporte a la Decisión

Holsapple y Whinston en 1996 identifican seis tipos de DSS. El primer tipo es Text-oriented DSS en los que la información es almacenada en formato de texto, el segundo es Databased-oriented DSS donde las bases de datos de las organizaciones son las que juegan el rol principal en la estructura del DSS, el tercer tipo es Spreadsheet-oriented DSS es un sistema de modelado que permite al usuario desarrollar modelos para ejecutar análisis, el Solver-oriented DSS donde es un algoritmo o procedimiento escrito como un programa de computador para resolver particulares tipos de problemas, Rule-oriented DSS también denominado DSS inteligente provee consejos para la toma de decisión mediante la vinculación de reglas, esos sistemas pueden proveer funciones cognoscitivas y probar que algunas cosas son ciertas o en otras ocasiones falsa o las razones por las cuales no se puede llegar a una conclusión con la información suministrada. El componente de conocimiento de los DSS incluye tanto procedimientos como reglas de inferencia, estas reglas pueden ser cuantitativas o cualitativas y el último tipo es el compound DSS es un sistema híbrido que incluye dos o más de las cinco estructuras básicas descritas anteriormente (Turban et al., 2005).

4.2.3.3 ¿Qué es un Sistema Basado en Reglas?

Los Sistemas Basados en Reglas (SBR) son una herramienta eficiente para tratar situaciones complejas que son gobernadas por reglas deterministas. Una regla es una afirmación lógica que relaciona dos o más objetos e incluye dos partes, la premisa y la conclusión. Cada una de estas partes consiste en una expresión lógica con una o más afirmaciones objeto-valor conectadas mediante los operadores lógicos y, o, o no. Si una expresión lógica contiene solo una afirmación objeto-valor se denomina expresión lógica simple, en caso contrario es una expresión lógica compuesta. Una regla que contiene solamente expresiones lógicas simples se denomina una regla simple, en otro caso se llama regla compuesta (Castillo et al., 1997)

Los sistemas basados en reglas están compuestos por dos elementos: La base de conocimiento que contiene las variables y el conjunto de las reglas que definen un problema y el motor de inferencia que se encarga de obtener las conclusiones aplicando la lógica clásica a las reglas (Sanchéz & De las heras, 2016).

Es recomendable utilizar SBR cuando el conocimiento es difuso, es decir que existe un gran número de afirmaciones las cuales son más o menos independientes las unas de las otras, cuando el proceso es representable como acciones independientes o Donde el conocimiento puede ser fácilmente separado para su uso (Mukundan & Ramani, 2007).

La base de conocimiento

En ella se representa de manera consistente, clara y computacionalmente eficiente el saber que se posee sobre un dominio, es decir que aquí se almacena la información necesaria sobre dicho dominio, información que debe ser adaptada para que el motor de inferencia la pueda comprender (Garcia, 2012) .

El motor de inferencia

El motor de inferencia utiliza los datos (hechos o evidencia) y el conocimiento (conjunto de reglas almacenadas en la base de conocimiento) para obtener nuevas conclusiones o hechos, así si la premisa de una regla es cierta, entonces la conclusión de la regla también es cierta (Sanchéz & De las heras, 2016).

Para obtener conclusiones, se utilizan diferentes reglas y estrategias de inferencia y control, los cuales serán desarrollados a continuación.

Reglas de inferencia y control

1. Modus Ponens y Modus Tollens: El Modus ponens es quizá la más utilizada para obtener conclusiones simples, en ella se examina la premisa de la regla y si es cierta la conclusión pasa a formar parte del conocimiento. Por ejemplo, se tiene la regla "Si A es cierto, entonces B es cierto" y además se sabe que "A es cierto" entonces se concluye que "B es cierto". Modus Tollens se utiliza también para sacar conclusiones simples, se examina la conclusión y si es falsa, se concluye que la premisa es falsa. Por ejemplo, se tiene a regla "Si A es cierto, entonces B es cierto" pero se sabe que "B es falso", utilizando Modus Ponens no se puede concluir nada, pero con Modus Tollens se concluye que "A es falso".

2. El mecanismo de Resolución: Para conclusiones compuestas que se basan en dos o más reglas, se utiliza el mecanismo de resolución donde inicialmente se sustituyen las reglas por expresiones lógicas equivalentes, posteriormente estas expresiones lógicas se combinan en una nueva expresión lógica la cual se utiliza para poder obtener la conclusión(Castillo et al., 1997)..

Control de la coherencia

El objetivo del control de la coherencia es evitar que el usuario suministre hechos inconsistentes al SBR y a su vez evitar que se presente conocimiento inconsistente o contradictorio en la base de conocimiento. Para esto antes de añadir una regla a la base de conocimiento se debe comprobar que la regla es consistente con las demás reglas, si es así, la regla se puede añadir a la base de conocimiento, en caso contrario debe ser revisada por un experto para su corrección. El control de coherencia se efectúa evaluando tres condiciones:

1. Coherencia de reglas: un conjunto de reglas se denomina coherente si existe, al menos, un conjunto de valores que conduzcan a conclusiones no contradictorias.

2. Valores no factibles: Un valor a para el objeto A no es factible si las conclusiones obtenidas al hacer A=a contradicen cualquier combinación de valores del resto de los objetos.

3. Coherencia de hechos: los datos o evidencias suministrados por los usuarios deben ser también consistentes en sí y con el conjunto de reglas de la base de datos. Es decir, el sistema no debe aceptar hechos que contradigan el conjunto de reglas y/o el conjunto de hechos existente en cada instante del proceso.

Explicando conclusiones

Por lo general los usuarios de un SBR esperan más allá de la conclusión, una explicación de la forma en la que el sistema llegó a dicha conclusión y dado que el sistema llega a la conclusión basándose en un conjunto de reglas y por lo tanto conoce de qué regla procede cada conclusión, le proporcionar al usuario una lista de hechos concluidos, junto con las reglas que ha utilizado para obtenerlas (Castillo et al., 1997).

Ventajas y desventajas de los Sistemas Basados en Reglas

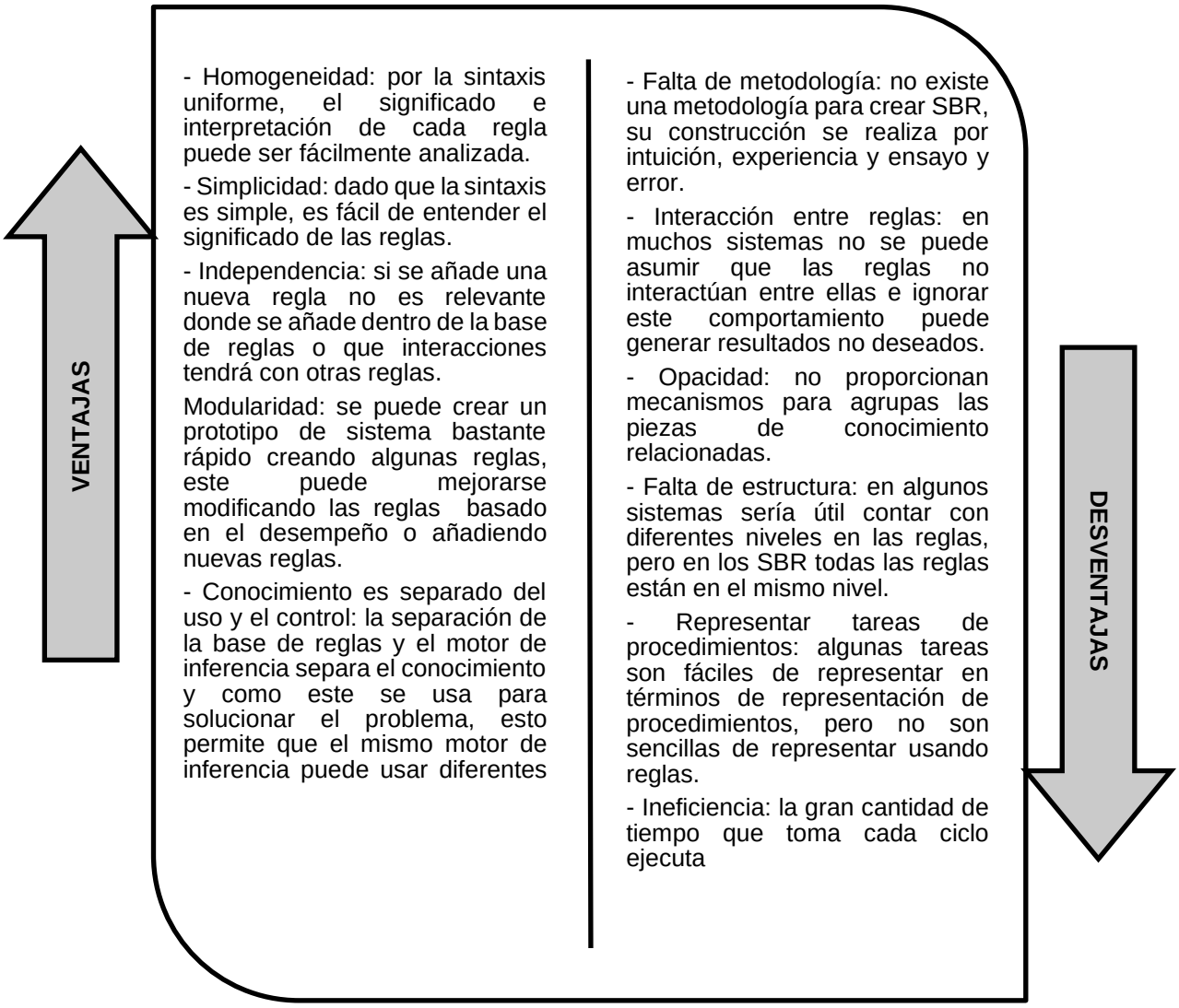


Ilustración 11 - Ventajas y desventajas de los SBR

4.2.4 Métodos de inferencia

4.2.4.1 aprendizaje computacional

El aprendizaje computacional (Machine learning) es un proceso automatizado que extrae patrones de un conjunto de datos, esto se logra a través de enseñar a las máquinas como manejar datos de manera eficiente (Kelleher et al., 2015). Para construir los modelos

utilizados en las aplicaciones de análisis predictivo de datos se utiliza aprendizaje supervisado

Aprendizaje supervisado: en este tipo de aprendizaje la máquina aprende una función que asigna una entrada (características descriptivas) a una salida (característica de destino) con base en un conjunto de ejemplos históricos, por lo que este tipo de algoritmos necesitan ayuda externa. En conjunto de datos de entrada o de características descriptivas se divide en dos subconjuntos: uno de entrenamiento y uno de prueba, con el primer subconjunto realiza el aprendizaje y con el segundo subconjunto realiza predicciones o clasificaciones para evaluar la precisión del proceso de entrenamiento (Batta, 2020).

4.2.4.2 Método 1-R

Es uno de los métodos más simples, que genera un conjunto de reglas que prueban un atributo en particular. 1-R escoge el atributo que produce reglas con el menor número de errores, el pseudocódigo es el siguiente:

Para cada atributo:
Para cada valor del atributo:
Contar las veces que cada clase aparece
Identificar la clase más frecuente
Hacer que la regla asigne esa clase para el valor del atributo
Calcular la taza de error de la regla
Escoger la regla con la menor tasa de error.

4.2.4.3 Método PRISM

Es un algoritmo de cobertura que va añadiendo pruebas a la regla que se está construyendo, siempre con el objetivo de crear una regla con la máxima precisión. Para ello, se escoge un par atributo-valor, para maximizar la probabilidad de la clasificación deseada, el pseudocódigo es:

Para cada clase C
Inicializar E a la instancia establecida
Mientras que E contiene instancias de la clase C
Crear una regla R con un lado izquierdo (LHS) vacío que prediga la clase C
Hasta que R sea perfecto (o no haya más atributos que se pueda utilizar) hacer.
Para cada atributo A no mencionado en R, y cada valor v,
Considere añadir la condición A = v al LHS de R
Seleccionar A y v para maximizar la precisión p / t

(En caso de empate, elegir la condición con la mayor p)
Añadir A = v en R
Retirar los casos cubiertos por R de E

4.2.4.4 Naive Bayes

Esta técnica a diferencia del método 1-R utiliza todos los atributos y permiten que contribuyan a la decisión, asumiendo que son igualmente importantes e independientes entre sí. El método es simple e intuitivo y está basado en la regla de probabilidad condicional de Bayes.

4.2.4.5 Árboles de decisión

Es uno de los métodos prácticos más ampliamente utilizados para la inferencia por inducción. Los árboles de decisión clasifican instancias, ordenándolas a partir de la raíz, recorriendo diversos nodos de decisión, hasta llegar a un nodo tipo hoja, que es el que proporciona la clasificación de la instancia considerada. Cada nodo de decisión especifica la prueba de algún atributo de la instancia y cada ramal descendiente que parte del nodo corresponde a uno de los valores posibles que puede asumir el atributo.

El aprendizaje por medio de árboles de decisión es generalmente más apropiado para problemas que poseen las siguientes características:

- Las instancias son representadas por partes de atributo-valor.
- La función objetivo posee valores de salida discretos.
- Las descripciones son disyuntivas.
- Los datos de entrenamiento pueden contener errores.
- Los datos de entrenamiento pueden tener atributos con valores incompletos o faltantes.

La mayoría de los algoritmos desarrollados para el aprendizaje de árboles de decisión, son variantes alrededor del algoritmo central que utiliza la búsqueda codiciosa de arriba hacia abajo (Top-down greedy search) a través del espacio de posibles árboles de decisión. Esta estrategia de búsqueda está ejemplificada en el algoritmo ID3 y su sucesor el C4.5.

Algunas de las ventajas de utilizar árboles de decisión son:

- Facilidad para entender e interpretar los resultados, de hecho, los árboles pueden ser visualizados de manera gráfica.
- Requieren poca preparación de los datos pues no es necesaria la normalización, creación de variables *dummy*.
- Es posible utilizar datos tanto numéricos como categóricos.
- Permiten manejar problemas multiclase.
- Su interpretación se realiza mediante lógica booleana.

Ahora, algunas de sus desventajas son:

- Se puede caer en un sobreajuste del árbol.
- Suelen ser muy inestables dado que pequeñas variaciones en los datos pueden generar árboles completamente diferentes.
- Las predicciones de los árboles de decisión no son uniformes ni continuas, sino aproximaciones constates, por lo que no son buenos para la extrapolación.
- Se pueden generar árboles de decisión sesgados si hay clases dominantes, por lo que es recomendable equilibrar el conjunto de datos antes de entrenar el árbol de decisión (Pedregosa et al., 2019).

4.2.4.6 Algoritmo ID3:

Empieza la construcción del árbol de decisión con la pregunta: ¿cuál atributo debería ser comprobado en la raíz del árbol? para responder la pregunta se evalúa mediante pruebas estadísticas que tan bien por sí solo cada atributo es capaz de clasificar los ejemplos de entrenamiento, se selecciona el mejor atributo y se lo usa como la prueba en la raíz del árbol. Luego se crea un descendiente de la raíz del árbol por cada posible valor de ese atributo y los ejemplos de entrenamiento se ordenan en el nodo descendiente apropiado. Luego se repite todo el proceso utilizando los ejemplos de entrenamiento asociados con cada nodo descendiente a fin de seleccionar el mejor atributo a probarse en este nivel del árbol.

La medida cuantitativa que indica la propiedad clasificadora de un atributo es la ganancia de información que se define como la reducción esperada en la entropía, causada por la partición de los ejemplos, de acuerdo con el atributo considerado. ecuación página 150.

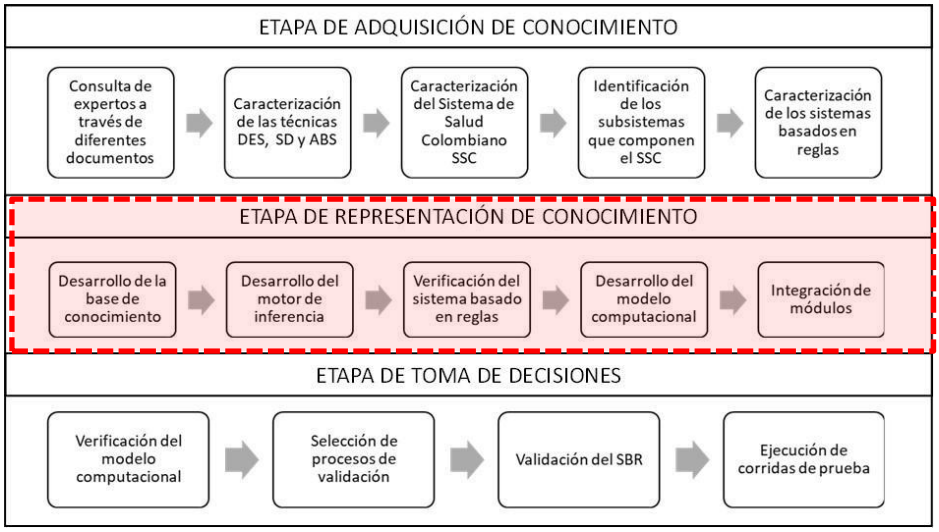
Algunos problemas prácticos que aparecen en el aprendizaje basado en árboles de decisión incluyen:

- Qué tan profundo se debe construir el árbol de decisión.
- Cómo se debe manejar atributos cuyos valores no sean nominales sino continuos.
- Cómo seleccionar la métrica apropiada para la selección de atributos.
- Manejar ejemplos de entrenamiento cuyos atributos tienen datos faltantes o están incompletos.
- Administrar atributos con diferentes costos o ponderaciones.
- Mejorar la eficiencia computacional de los algoritmos.

4.2.4.7 Algoritmo C4.5

Una amplia variedad de extensiones al algoritmo ID3 básico han sido desarrolladas por diferentes investigadores. Entre estas se incluyen métodos para la poda de árboles, el manejo de atributos con valores reales, procesamiento de ejemplos de entrenamiento que tienen valores faltantes en sus atributos, refinamiento incremental de árboles de decisión a medida que se dispone de nuevos ejemplos de entrenamiento, uso de otras métricas para la selección de atributos diferentes de la ganancia de información, consideración de costos asociados a las instancias de los atributos. Uno de los algoritmos que considera la mayoría de estas extensiones, es el denominado C4.5.

5. REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO



5.1 DESARROLLO DE LA BASE DE CONOCIMIENTO

5.1.1 Base de datos

Como resultado de la adquisición de conocimiento, se obtiene una base de datos (*Anexo 1 – Base de conocimiento, hoja Base de datos*) con la estructura que se presenta a continuación:

ID	AÑO PUBLICACIÓN	TITULO	AUTOR	# Artículos	TECNICA 1	TECNICA 2	ACTOR	NIVEL DE DECISION	CAMPO DE APLICACIÓN	ÁREA DE APLICACIÓN	M.D.	VAR	PAR	Observaciones
3	2019	Mathematical modelling for health systems research: a systematic review of	Rachel Cassidy, Neha S. Singh	1	ABS		EPS	Táctico	Planeación táctica	Financiero	Where providers were allowed to opt out of ACO network, they were able to	• Provider (hospitals, primary care physician clinics) • Payer (Medicare)	Key model groups • Patients could bypass their assigned healthcare	Fuentes de las reglas • Literature (epidemiological studies, cost-effectiveness
3	2019	Mathematical modelling for health systems research: a systematic review of	Rachel Cassidy, Neha S. Singh	1	ABS		EPS	Táctico	Planeación táctica	Financiero	• Creation of a model that can be used to compare health care reimbursement	Tipos de agentes: • Patient • Medical provider	Key model rules • A patient develops a chronic medical issue (such	Fuentes de las reglas • Literature (epidemiological studies, cost-effectiveness

Ilustración 12 - Estructura de la base de datos

Esta base de datos contiene las variables que posteriormente serán adaptadas a reglas de tal manera que puedan ser interpretadas por el motor de inferencia, la estructura de la base de datos se conforma de la siguiente manera:

- **ID:** consecutivo de identificación del *paper* consultado

- **Año de publicación:** año de publicación del artículo
- **Título:** título de la publicación
- **Autor:** autor(es) de la publicación
- **# Artículos:** en caso de ser un artículo de revisión, se refiere a la cantidad de papers que hacen parte de dicha revisión
- **Técnica 1:** técnica de simulación que es utilizada en la investigación del artículo (DES, SD, ABS)
- **Técnica 2:** en caso de que la investigación utilice dos técnicas de simulación para abordar el problema, se relaciona en esta columna dicha técnica.
- **Actor:** hace referencia al actor del sector salud (descritos en el marco referencial del estado del arte) que se ve(n) involucrados en la investigación presentada en el artículo
- **Nivel de decisión:** hace referencia al nivel de la decisión o del problema que es abordado en el artículo (estratégico, táctico u operativo)
- **Campo de aplicación:** hace referencia al campo de aplicación para cada nivel de decisión (descritos en el marco referencial del estado del arte) que se ve(n) involucrados en la investigación presentada en el artículo
- **Área de aplicación:** hace referencia al área de aplicación (descritas en el marco referencial del estado del arte) que se ve(n) involucradas en la investigación presentada en el artículo
- **M.D.:** se relacionan las medidas de desempeño que utilizó el modelo de simulación presentado en el artículo.
- **VAR:** se relacionan las principales variables de decisión que utilizó el modelo de simulación presentado en el artículo
- **PAR:** se relacionan los parámetros, bucles de retroalimentación, comportamientos, reglas, etc. utilizados en el modelo de simulación presentado por el artículo
- **Observaciones:** se relaciona cualquier otro tipo de información significativa para SETESSCO tal como el tipo de software empleado para el desarrollo del modelo de simulación, definición de siglas, aclaraciones relevantes de consideraciones del modelo, etc.

Como se refirió en el numeral 4.2.1 Revisión de literatura, la base de datos cuenta con un total de 1.439 a partir de los cuales se construye la base de conocimiento.

Las reglas del tipo modus ponens son definidas mediante aprendizaje computacional de tipo supervisado, más puntualmente mediante la herramienta de árbol de decisión, el cual se desarrolla utilizando el módulo para Machine Learning en Python: scikit-learn.

5.1.2 Generación del árbol de decisión

Scikit-learn es un módulo de Python que integra una amplia gama de algoritmos de Machine Learning de última generación que permite abordar problemas de tipo supervisado y no supervisado mediante un lenguaje de alto nivel de propósito general que facilita su uso y rendimiento (Pedregosa et al., 2019).

Decision Tree es uno de los métodos disponibles de aprendizaje supervisado en el módulo *Scikit-learn* que permite generar árboles de decisión para clasificación o regresión. El objetivo es crear un modelo que prediga el valor de una variable objetivo mediante reglas simples de decisión inferidas de un conjunto de características, en este orden de ideas, el árbol de decisión utilizado para crear las reglas que conformaran la base de conocimiento del SBR toma como variable objetivo la técnica de simulación utilizada para abordar el problema relacionado con el sistema de salud y como conjunto de características el nivel de la decisión, el campo y el área del problema a tratar.

El algoritmo que genera el árbol de decisión utiliza la entropía para medir la cantidad de desorden de la información y de esta manera elegir el mejor nodo hasta llegar a la profundidad máxima, cuando la entropía vale 0, significa que las muestras del nodo son completamente homogéneas, por lo que se busca un árbol que tenga entropía pequeña en sus nodos (Moreno, 2020).

Considerando lo anteriormente descrito, se utiliza el método *DecisionTreeClassifier* de Python para realizar la clasificación de varias clases en un conjunto de datos, este clasificador toma como entradas dos matrices: *(n_samples, n_features), a* continuación, se presentan los pasos que permiten la generación del árbol de decisión:

Paso 1: Generación de un DataFrame (estructura de dos dimensiones) que permite leer la base de datos con formato CSV:

```
df = pd.read_excel("raw_data.xlsx", names=['NLEVEL', 'NFIELD', 'NAREA', 'NTEC1'])
```

Dado que el método *DecisionTreeClassifier* no procesa variables categóricas, es necesario transformar la base de datos que se presentó en el numeral anterior de tal manera que se genere una nueva base de datos con valores numéricos que se conforma de cuatro columnas: el nivel estratégico (3 valores), el campo de aplicación (7 valores), el área de aplicación (43 valores) y la técnica de simulación que al ser las clases pueden ser incluidos dentro del algoritmo como.

Paso 2: Extracción de los arreglos del DataFrame que corresponde a los parámetros (X: Nivel estratégico, campo de aplicación y área de aplicación) y la variable a predecir (Y: Técnica de simulación)

```
X = df[['NLEVEL', 'NFIELD', 'NAREA']]
X =X.values
Y = df['NTEC1']
Y = Y.values
```

De esta manera se conforman el conjunto de características y la variable objetivo.

Paso 3: Segregación de la muestra en subconjuntos aleatorios de entrenamiento y prueba. Para ello se toma el 80% de los datos del conjunto como subconjunto de entrenamiento y el 20% restante como subconjunto de prueba.

```
testSize = 0.8
X_trn, X_tst, Y_trn, Y_tst = train_test_split(X, Y, test_size=testSize, random_state=int(time.time()))
```

Paso 4: Con el objetivo de evaluar el desempeño del árbol de decisión bajo diferentes niveles de profundidad, se anida el clasificador dentro de un ciclo iterativo que permita entrenar el algoritmo con cada nivel de profundidad y recoger las medidas de desempeño que se mostrarán más adelante.

Arreglo de profundidades del árbol a evaluar:

```
deep = [1, 3, 5, 7, 9]
```

Dentro del ciclo se genera el clasificador con el nivel de profundidad correspondiente a la iteración del ciclo.

```
for d in deep:
    tic = time.time()
    clf = DecisionTreeClassifier(max_depth=d)
```

Paso 5: se realiza el entrenamiento del árbol de decisión con el subconjunto de entrenamiento:

```
clf.fit(X_trn, Y_trn)
```

Paso 6: graficar el árbol de decisión mediante el módulo *matplotlib*.

```
## ----------- Plot del árbol de decisión ----------##

fig = plt.figure(figsize=(25, 20))
_ = tree.plot_tree(clf,
                   feature_names=clases,
                   class_names=['DES','ABS','SD'],
                   filled=True)
fig.savefig("decision_tree.png")
plt.show()
```

Paso 7: usando el clasificador ya entrenado se genera la predicción de la clase (Y_tst) para los valores de los parámetros asignados al subconjunto de prueba (X_tst):

```
Y_pred=clf.predict(X_tst)
```

Paso 8: Se genera la matriz de confusión que permitirá conocer: Verdaderos positivos (tp), falsos positivos (fp), falsos negativos (fn) y verdaderos negativos (tn), para esto se comparan las etiquetas predichas *Y_pred* con las etiquetas reales del subconjunto de prueba *Y_tst*

```
cm = confusion_matrix(Y_tst, Y_pred)
```

Como resultado se obtiene el árbol de decisión (*Anexo 2 – Árbol de decisión*) con una profundidad de 5 niveles, esta decisión se tomó luego de analizar la matriz de confusión generada para cada clasificador con los valores contenidos en el arreglo de profundidades, la tabla a continuación resume los resultados obtenidos:

Profundidad	Precisión	Recall	F1	Accuracy
1	0.51	0.6	0.55	0.6
3	0.53	0.58	0.53	0.58
5	**0.58**	**0.62**	**0.58**	**0.62**
7	0.6	0.63	0.6	0.63
9	0.58	0.62	0.59	0.62

Tabla 4 - Resumen de las medidas de desempeño con diferentes niveles de profundidad

Para evitar un sobreajuste y considerando que las medidas de desempeño no presentan una variación significativa se selecciona un nivel de profundidad de 5. En el numeral 5.3 Verificación del sistema basado en reglas se presenta con mayor detalle la validación del árbol de decisión.

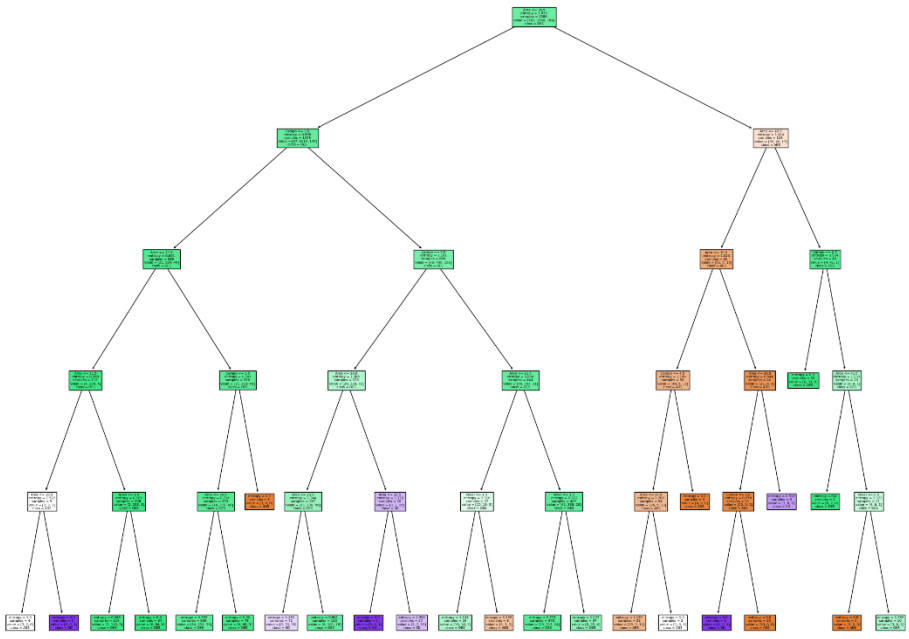


Ilustración 13 - Árbol de decisión

Cada rectángulo del árbol de decisión representa un nodo que contiene información como:

- Condición: muestra la condición que está siendo evaluada en el nodo, para este caso respecto al área, el campo o el nivel.
- Entropy: es el índice que mide el desorden de información o la cantidad de aleatoriedad en un nodo.
- Samples: número de muestras que satisfacen las condiciones para llegar al nodo
- Value: cuántas muestras de cada clase llegan al nodo, en este caso, el primer valor representa la clase ABS, el segundo valor DES y el tercer valor SD.
- Class: indica qué clase se le asigna a las muestras que llegan a este nodo.

Las reglas son generadas a partir de los nodos terminales (nodos hojas) como se presenta en el siguiente numeral.

5.1.3 Generación de la base de conocimiento

Luego de la generación del árbol de decisión, se procede a definir las reglas, en total se generaron 25 reglas con la estructura que se presenta a continuación:

Regla 24			
Nivel	**Campo**	**Área**	**Técnica**
Táctico	Planeación Táctica	RR HH	ABS
Estratégico	Planeación estratégica	RR HH	ABS
Táctico	Planeación táctica	RR HH	ABS
Operativo	Programación	RR HH	ABS

Tabla 5 - Ejemplo de una regla de la base de conocimiento

- **Nivel:** evalúa el nivel de decisión del problema a abordar, para el ejemplo presentado en Tabla 5 - Ejemplo de una regla de la base de conocimiento, implica que el problema debe pertenecer al nivel estratégico.
- **Campo:** evalúa el campo de aplicación, para el ejemplo, el problema debe pertenecer a planeación táctica, planeación estratégica o programación.

- **Área:** evalúa el área de aplicación, para el ejemplo, el problema debe estar relacionado con la gestión del recurso humano.
- **Técnica:** indica la técnica de simulación que se sugiere sea utilizada para el problema que pertenece al o los nivel(es), campo(s) y área(s), en este caso, es Simulación Basada en Agentes (ABS).

Siguiendo esta misma estructura fueron definidas las 25 reglas que conforman la base de conocimiento y que pueden ser consultadas en su totalidad en el Anexo 4 - Base de conocimiento.

5.2 DESARROLLO DEL MECANISMO DE INFERENCIA

Como se refirió anteriormente el mecanismo de inferencia es el responsable de utilizar los datos (hechos o evidencia) y el conocimiento (conjunto de reglas almacenadas en la base de conocimiento) para obtener nuevas conclusiones o hechos, de esta manera los datos que para nuestro caso es la información que ingresa el usuario correspondiente al nivel de decisión, campo y área de aplicación del problema de interés se evalúan frente al conocimiento que está representado en la base de conocimiento presentada en el numeral anterior, para así obtener la inferencia de la técnica de simulación que se debe utilizar para abordar el problema de interés del usuario.

Estas reglas son adaptadas de tal manera que se permita su interpretación e interacción con el usuario mediante el desarrollo de un aplicativo desarrollado con VBA denominado SETESSCO (Sistema Experto para la selección de Técnicas de Simulación para el Sistema de Salud en Colombia), el cual permite que el usuario ingrese los datos, para que luego de que estos sean evaluados frente a las reglas, se pueda concluir cual es la técnica de simulación más apropiada para modelar el problema de interés.

Dado que las 25 reglas presentadas en el numeral anterior tienen puertas lógicas del tipo OR, el mecanismo de inferencia se compone de 233 reglas considerando por separado estas puertas lógicas, por ejemplo, considerando la regla 2:

Regla 2			
Nivel	**Campo**	**Área**	**Técnica**
Estratégico	Control estratégico	Calidad Logística Operaciones	SD
Operativo	Control operativo	Calidad Logística Operaciones	SD
Táctico	Control táctico	Calidad Logística Operaciones	SD
Táctico	Planeación Táctica	Calidad Logística Operaciones	SD

Tabla 6 - Estructura de la Regla 2

De esta regla se derivan las siguientes:

i. Nivel = Estratégico, Campo = Control estratégico, Área = Calidad, Logística y Operaciones, entonces la técnica es SD.
ii. Nivel = Operativo, Campo = Control operativo, Área = Calidad, Logística y Operaciones, entonces la técnica es SD.
iii. Nivel = Táctico, Campo = Control táctico, Área = Calidad, Logística y Operaciones, entonces la técnica es SD.
iv. Nivel = Táctico, Campo = Planeación táctica, Área = Calidad, Logística y Operaciones, entonces la técnica es SD.

Teniendo en cuenta lo anterior, de una de las reglas definidas por el árbol de decisión, en el mecanismo de inferencia serán incluidas 4 reglas, lo cual facilita la evaluación de las reglas por parte del módulo de VBA sobre el cual está desarrollado SETESSCO.

5.3 VERIFICACIÓN DEL SISTEMA BASADO EN REGLAS

Para la validación del SBR como se presentó anteriormente en la descripción de la generación del árbol de decisión, se divide la base de conocimiento en dos subconjuntos aleatorios: uno de entrenamiento y uno de prueba donde el 80% de los datos componen el

primer subconjunto y el 20% restante corresponde al subconjunto de prueba, de esta manera el árbol de decisión es entrenado con los datos de entrenamiento para posteriormente predecir la clasificación de los datos de prueba y determinar la fracción de predicciones correctas. Es importante resaltar que la matriz de las métricas asociadas al clasificador aquí utilizado se presenta para cada una de las tres clases (DES, SD, ABS) (filas de la 1 a la 3 de la Ilustración 14 - Medidas de desempeño del clasificador) y de manera global para el modelo: macro avg y weighted avg. A continuación, se presentan las principales medidas de desempeño derivadas de la matriz de confusión:

	precision	recall	f1-score	support
1	0.65	0.95	0.77	300
2	0.37	0.23	0.29	108
3	0.20	0.02	0.03	106
accuracy			0.61	514
macro avg	0.41	0.40	0.36	514
weighted avg	0.50	0.61	0.52	514

Ilustración 14 - Medidas de desempeño del clasificador

Para la evaluación del SBR consideraremos las métricas del promedio ponderado (weighted avg) dado que la cantidad de registros por clases no está balanceada. Las principales métricas (Thanaki, 2018) para la evaluación del modelo son:

- **Precisión (Precision):** es el número de elementos identificados correctamente como positivos, lo que permite medir la calidad del modelo, para nuestro caso de manera global el 41% de los problemas del sector salud evaluados en nuestra herramienta tendrán una asignación correcta de la técnica de simulación.

$$precisión = \frac{TP}{TP + FP}$$

Donde,

- *TP (True positives): el verdadero positivo se presenta cuando la clase real y la clase predicha son verdaderos.*
- *FP (False positives): el falso positivo se presenta cuando la clase real es falsa, pero la clase predicha es positiva.*

- **Exactitud (accuracy):** es el porcentaje de casos que el modelo ha clasificado de manera correcta, en nuestro caso corresponde al 61% de los papers que conforman la muestra de prueba. Sin embargo, se debe considerar que esta métrica no resulta útil cuando los datos están desequilibrados.

$$exactitud = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN}$$

Donde,

- *TP (True positive): el verdadero positivo se presenta cuando la clase real y la clase predicha son verdaderas.*
- *TN (True negative): el verdadero negativo se presenta cuando la clase real y la clase predicha son falsas.*
- *FP (False positive): el falso positivo se presenta cuando la clase real es falsa y la clase predicha es verdadera.*
- *FN (False negative): el falso negativo se presenta cuando la clase real es verdadera y la clase predicha es falsa.*

Se debe tener en cuenta que los artículos que conforman el modelo tienen la siguiente participación: el 76% de los problemas son modelados mediante DES, el 13% de los artículos utilizan ABS y el restante 12% utiliza SD, esto muestra un desbalance entre los datos que conforman la base de conocimiento, hay que considerar que, dentro de la línea temporal de las tres técnicas de simulación, DES, es la técnica más antigua pues a mediados de la década de los 50 comenzaba a aumentar el interés en el uso de los conceptos y de lenguajes de programación relacionados con este tipo de modelado (Bergin et al., 1996), la segunda técnica en aparecer es SD, en el artículo “System dynamics—a personal view of the first fifty years” escrito por Jay Forrester se menciona que los primeros proyectos relacionados con dinámica de sistemas datan del comienzo de los año 60 (Forrester & Forrester, 2007). En cuanto a ABS a comienzos de los 80 se empieza a emplear el modelado basado en agentes para analizar el efecto de la cooperación en dilemas colectivos con el trabajo de Axelrod y fue hasta 1999 con la aparición de Netlogo

(Wilensky 1999) que se incrementó el uso de esta técnica en el modelado de problemáticas sociales.

Esta línea temporal se ve reflejada en la cantidad de artículos por año presentado en artículos de revisión. La Ilustración 15 - Frecuencia de las publicaciones por año (Long & Meadows, 2018) presenta muestra que de la revisión realizada por Long & Meadows en el 2018 los papers que utilizan ABS y SD comienzan a tener una mayor participación en el modelado de problemas del sector salud después del 2005.

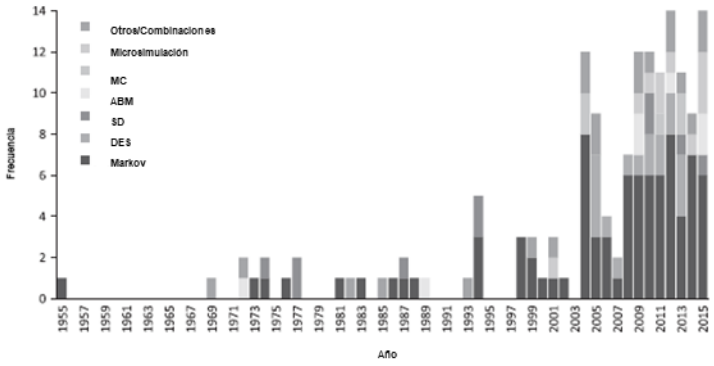


Ilustración 15 - Frecuencia de las publicaciones por año (Long & Meadows, 2018)

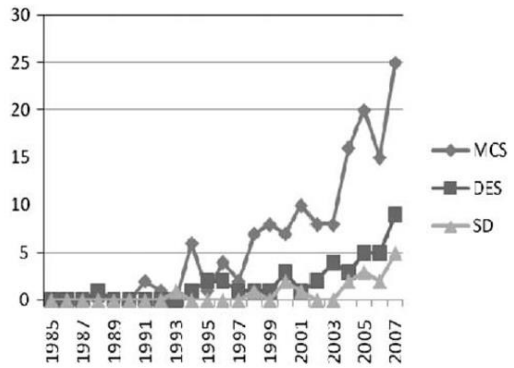


Ilustración 16 - Número de papers por técnica de simulación a través de los años (Katsaliaki & Mustafee, 2011)

En la revisión realizada por Katsaliaki & Mustafee se evidencia que la Simulación de Eventos Discretos (incluida la simulación de Monte Carlo) es la que tiene mayor

participación dentro del horizonte temporal, la Dinámica de Sistemas empieza a ser utilizada del año 1998 en adelante, sin embargo, no es la técnica más utilizada.

Finalmente, en la Ilustración 17 - Artículos por técnica de simulación a través del tiempo, se presenta la cantidad de artículos por técnica de simulación a lo largo de los años que hacen parte de la base de conocimiento, de manera alineada con los dos artículos de revisión referidos anteriormente es DES la técnica más utilizada del 2007 hacia atrás y aunque del 2008 en adelante aparecen con mayor frecuencia el uso de SD y ABS, continúa siendo DES la técnica más utilizada.



	<1998	1998 - 2002	2003 - 2007	2008 - 2012	2013 - 2017	>2018
ABS	0	0	2	19	58	89
DES	107	11	30	219	133	59
SD	0	12	11	30	45	24

Ilustración 17 - Artículos por técnica de simulación a través del tiempo

Todo lo anterior permite encontrar una explicación al desbalance de los datos que conforman el árbol de decisión, y aunque ya se revisó la precisión y la exactitud del modelo, es importante considerar que la exactitud del 61% puede no funcionar bien para evaluar la calidad del modelo, ya que podría clasificar como DES la mayoría de los problemas y tener una alta probabilidad de acierto debido a que es la clase más representativa, por lo anterior en aras de realizar una validación más asertiva del modelo, se incluyen dos métricas adicionales:

- **Exhaustividad (Recall):** esta métrica muestra la habilidad del clasificador de encontrar todas las muestras positivas, es una de las métricas más apropiadas para tratar casos de datos desbalanceados (Pandey et al., 2022), la exhaustividad es mayor cuando las predicciones tienen una tasa de falsos negativos baja, en este caso, el árbol de decisión tiene una exhaustividad del 61%**.**

$$recall = \frac{TP}{TP + FN}$$

- **Valor F (F1-score):** es la media armónica entre la precisión y la exhaustividad, el valor F castiga la baja exhaustividad y la baja precisión, de esta manera si se tiene una alta exhaustividad y una baja precisión, el valor F será bajo. Para el árbol de decisión del presente modelo el valor F es del 52%

$$F1 = 2 * \frac{precisión * recall}{precisión + recall}$$

Este proceso de verificación nos muestra que el árbol de decisión a través del cual fueron generadas las reglas que conforman la base de conocimiento del mecanismo de inferencia tiene una exhaustividad del 61% lo cual indica que el modelo no tiene una alta sensibilidad, sin embargo, a pesar que SETESSCO tiene múltiples oportunidades de mejora que serán descritas más adelante, constituye un excelente punto partida para la generación de una herramienta que permita iniciar en el mundo de la simulación de problemáticas del sector salud a los modeladores y tomadores de decisión.

5.4 DESARROLLO DEL MODELO COMPUTACIONAL (SETESSCO)

Durante esta fase de la metodología se desarrolló el prototipo del modelo computacional que permite la interacción entre el usuario y el sistema basado en reglas, el prototipo SETESSCO (Sistema Experto para la Selección de Técnicas de Simulación para el Sistema de Salud en Colombia) está desarrollado en Microsoft Excel mediante VBA y permite que el usuario a través de la elección de opciones dispuestas en los formularios que conforman la interfaz pueda utilizar los diferentes módulos que conforman el aplicativo y que serán descritos a continuación:

Descripción general: SETESSCO está compuesto por tres módulos:



Ilustración 18 - Descripción general SETESSCO

- **Exploración del Sistema de Salud en Colombia**: presenta los aspectos más representativos del Sistema de Salud en Colombia donde puede navegar a través de diferentes opciones que le permitirán conocer la descripción general del SGSSS, los diferentes sistemas que lo componen, los actores que están involucrados en el sistema, los niveles de decisión, las áreas de interés y las principales normativas.
- **Selección de la técnica de simulación**: este módulo le permitirá conocer la técnica de simulación que más se ajusta al problema asociado al sector salud según el actor, campo y área de interés que haya seleccionado.
- **Modelos de simulación**: este módulo del aplicativo le permitirá conocer algunos de los aspectos más relevantes para poder llevar a cabo un modelo de simulación que permita abordar la problemática del sector salud que sea de su interés, dichos aspectos incluyen la metodología, las variables, parámetros y medidas de desempeño a considerar y finalmente algunas sugerencias del software que podría utilizar para ejecutar el modelo computacional.

El primer módulo es la **exploración del Sistema de Salud en Colombia**, este módulo permite al usuario conocer algunos de los principales aspectos del SGSSS, como su descripción general, los tipos de sistemas (Regímenes) en los que se divide el sistema de salud, los actores que lo conforman, los niveles de decisión, los campos y las áreas en los

que se pueden agrupar los problemas relacionados con el sistema de salud y la principal normativa que lo regula, la interacción entre el usuario y el aplicativo se da a través del formulario que se presenta en la Ilustración 19 - Módulo 1: Explorar el Sistema de Salud en Colombia donde cada botón al ser seleccionado dirigirá al usuario al aspecto en el cual el usuario desea profundizar. Cada módulo cuenta con un botón de ayuda (¿cómo navegar?) en la que se explica al usuario el uso del módulo del aplicativo, también cuenta con un botón de "volver" que permite al usuario ir al menú principal Ilustración 18 - Descripción general SETESSCO

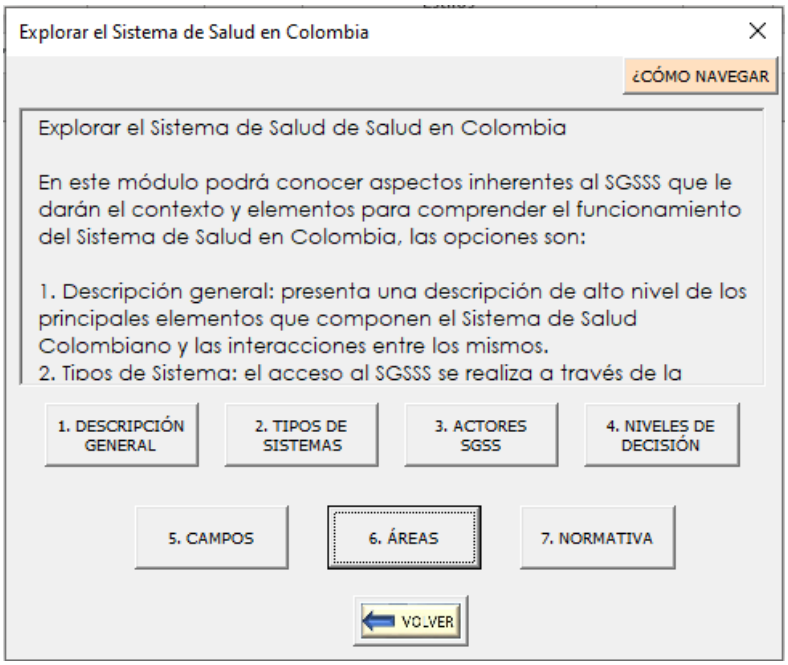


Ilustración 19 - Módulo 1: Explorar el Sistema de Salud en Colombia

El segundo módulo **Selección de la técnica de simulación** es el que permite la interacción del usuario con el Sistema Basado en Reglas definido en el capítulo Desarrollo del mecanismo de inferencia, dicha interacción se hace mediante el formulario presentado en la Ilustración 20 – Módulo 2: Selección de la técnica de simulación donde el usuario selecciona el actor, el campo de aplicación al que hace parte el problema de interés y las áreas que son abordadas en el problema.

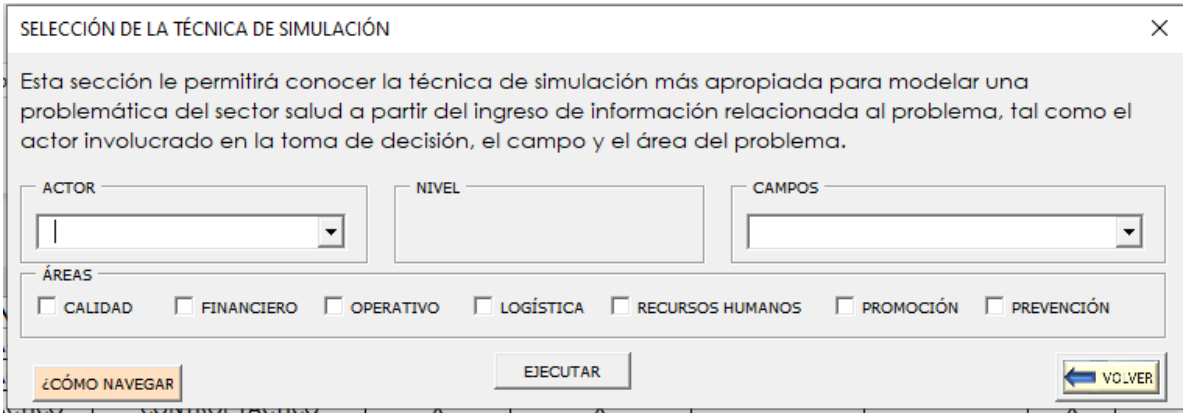


Ilustración 20 – Módulo 2: Selección de la técnica de simulación

Una vez definidos los parámetros de entrada el usuario selecciona el botón “Ejecutar” lo que activa una macro que evalúa los parámetros de entrada frente a las reglas de decisión que trae como resultado la aparición de un nuevo campo en el formulario donde se presenta la técnica de simulación que es recomendada al usuario para llevar a cabo el modelado del problema de interés.

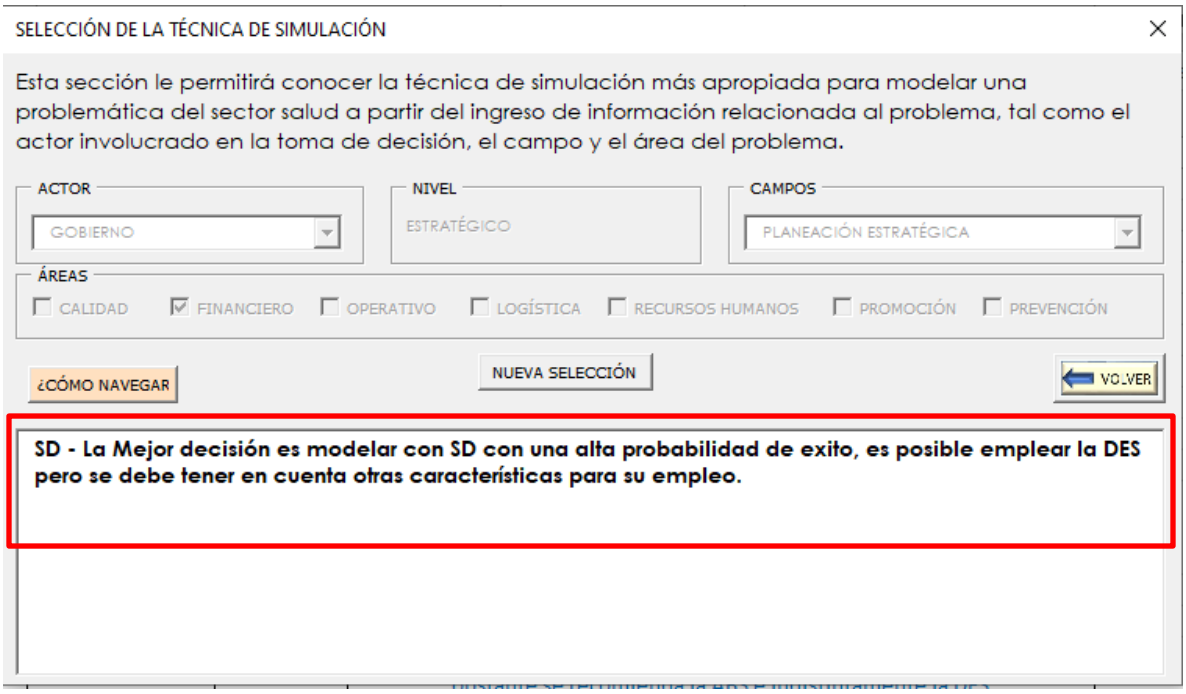


Ilustración 21 - Resultado de la Selección de la técnica de Simulación

El tercer módulo **Metodologías de simulación** proporciona información relacionada con las metodologías para el desarrollo del modelo de simulación según la técnica de interés, los componentes principales (medidas de desempeño y variables de interés) que se deben considerar al momento de modelar determinado problema relacionado con el sector salud y finalmente una lista del software que se puede utilizar según la técnica de simulación de interés, este módulo puede ser utilizado luego de que el usuario mediante el uso del módulo 2: Selección de la técnica de Simulación tenga definida la técnica sugerida por SETESSCO o bien puede ser un módulo netamente de consulta que permita al usuario ampliar su conocimiento en los tópicos mencionados anteriormente.

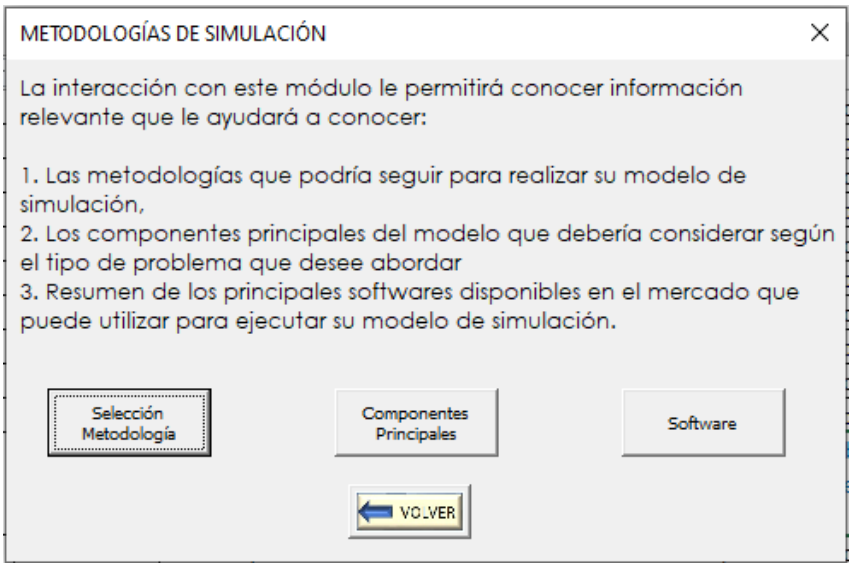


Ilustración 22 – Módulo 3: Metodologías de simulación

A continuación, se presenta una descripción más detallada de los componentes de este módulo.

- **Descripción Metodología:** en esta opción se presentan las metodologías para el desarrollo de modelos de simulación de diferentes autores para cada una de las técnicas de simulación de interés en el presente trabajo. El usuario puede seleccionar la técnica de su interés lo que le mostrará una lista de los autores que puede consultar, una vez seleccionados estos dos parámetros (técnica y autor) SETESSCO mostrará una descripción de la metodología, así como la referencia

bibliográfica que puede ser consultada por el usuario en aras de conocer con mayor detalle la metodología.

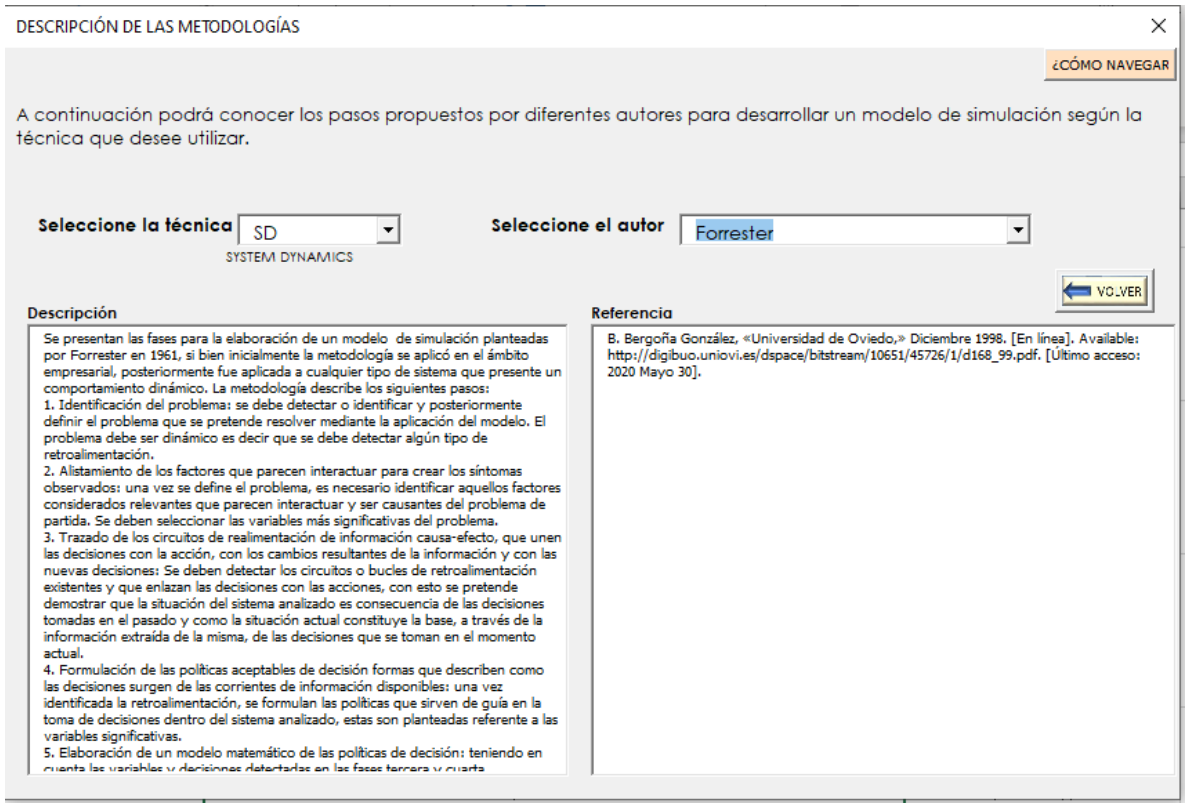


Ilustración 23 – Opción descripción de las metodologías

Esta opción se conforma por 12 metodologías diferentes: 5 de Simulación de Eventos Discretos, 5 de Dinámica de Sistemas y 2 de Simulación Basada en Agentes, las metodologías le muestran al usuario las fases que debería seguir para lograr modelar correctamente una situación problémica de interés, algunas metodologías incluyen además de las fases los componentes que se deben considerar dentro del modelo, las metodologías, los autores y las referencias de cada metodología se describen en la Tabla 7 - Metodologías de simulación.

Técnica de simulación	**Autor**	**Referencias**
DES	Banks, Carson, Nelson & Nicol	J. Banks, J. Carson, B. Nelson y D. Nicol, Discrete-Event system simulation (cuarta edición).
DES	Law & Kelton	A. M. Law y D. Kelton, Simulation modeling & analysis (segunda edición), 1991.
DES	Fishman	G. S. Fishman, Discrete-Event Simulation: Modeling, Programming and Analysis, 2001.
DES	Pooch & Wall	U. W. Pooch y J. A. Wall, Discrete Event Simulation: A practical Approach, 2000.
DES	Wainer	G. A. Wainer, Discrete-Event Modeling and Simulation: A Practitioner's Approach.
SD	Aracil	J. Aracil, Dinámica de Sistemas, 1995.
SD	Forrester	B. Bergoña González, «Universidad de Oviedo,» Diciembre 1998. [En línea]. Available: http://digibuo.uniovi.es/dspace/bitstream/10651/45726/1/d168_99.pdf. [Último acceso: 2020 Mayo 30].
SD	Kanti, Mohamed & Mohd	B. Kanti Bala, F. Mohamed Arshad y K. Mohd Noh, System Dynamics - Modelling and Simulation, 2017.
SD	Coyle	R. Coyle, System Dynamics Modelling: A Practical Approach, 1996.
SD	Ranganath & Rodrigues	B. Ranganath y L. Rodrigues, System Dynamics: Theory and Case Studies, 2008.
ABS	Wilensky	U. Wilensky y W. Rand, An introduction to agent-based modeling, 2015.
ABS	Cadavid	J. Cadavid, J. Velásquez, and D. Ovalle, “Hacia una Metodología para la Construcción de Modelos de Simulación Basados en Sistemas Multi-Agente.,” Rev. Av. en Sist. e Informática, vol. 2, no. 2, pp. 7–15, 2005.

Tabla 7 - Metodologías de simulación

- **Componentes Principales:** esta opción le proporciona al usuario las medidas de desempeño y las variables que se sugieren sean consideradas al momento de realizar un modelo de simulación, para acceder a esta consulta, el usuario debe ingresar el actor involucrado en el problema del sector salud que desea modelar, el campo y área de aplicación, así como el tema específico, este último parámetro hace referencia a un listado de temas extraídos de la base de conocimiento en los

que se encuentran las situaciones problémicas asociados al actor, área y campo de interés, por ejemplo, en la Ilustración 24 – Opción descripción de los componente, el usuario ha seleccionado el Gobierno como el actor involucrado en la situación problema de interés, el campo es la planeación estratégica, el área es Finanzas y finalmente del listado de situaciones problémicas asociadas a estos parámetros se ha seleccionado el recaudo de recursos por parte del Sistema General de Participaciones, luego de seleccionar estos parámetros, SETESSCO le presenta al usuario las medidas de desempeño que podría considerar dentro del modelo de simulación: aumento de las fuentes de recaudo, disminución de las fugas del recaudo, disminución de los costos del recaudo, así como las variables de interés que se deben estudiar dentro del modelo, para este caso: actores que participan en el recaudo, las tasas de recaudo por actor, las tasas de recaudo por actividades, etc.

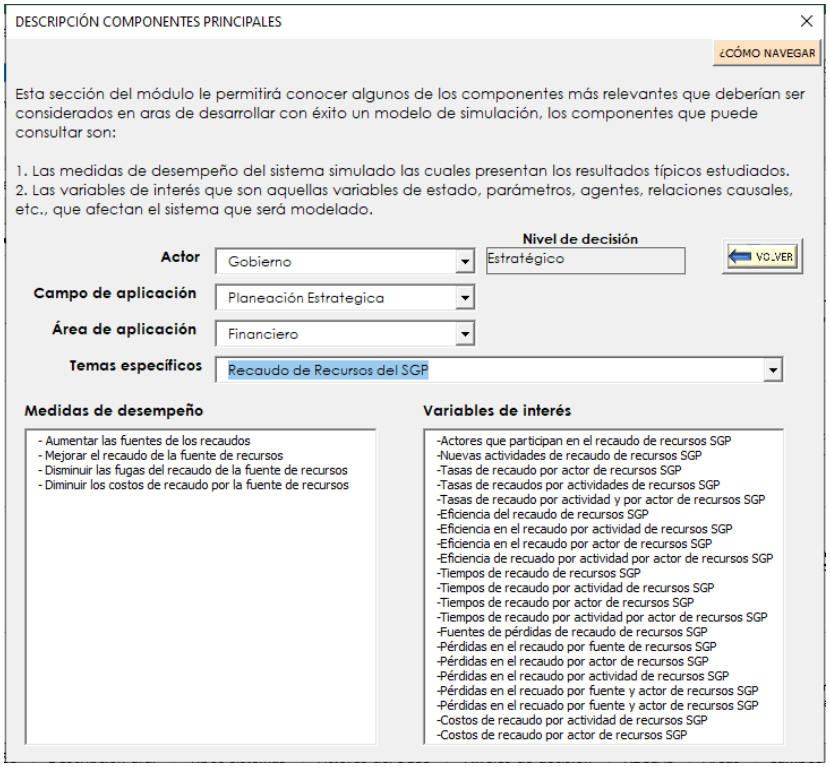


Ilustración 24 – Opción descripción de los componentes

La Tabla 8 - Temas incluidos en la descripción de componentes principales presenta los temas específicos que se están incluidos en este módulo de SETESSCO.

ACTOR	NIVEL DE DECISION	CAMPO APLICACIÓN	AREA DE APLICACIÓN	TEMAS ESPECIFICOS
Gobierno	Estratégico	Planeación Estratégica	Financiero	Recaudo de Recursos del SGP
				Recaudo por concepto de juegos de azar
				Recaudo de cotizaciones y copagos
				Recaudos de cajas de compensación
				Recaudos por SOAT
				Otros recaudos especiales
				Reconocimiento y pago de recursos a EPS del régimen contributivo
				Reconocimiento y pago de recursos a EPS del régimen subsidiado
				Reconocimiento y pago de nuevas reclamaciones a personas no afiliadas a una EPS.
				Reconocimiento y pago de incapacidades
				Fortalecimiento de la Red de Urgencias
				Inversión en infraestructura
				Evaluación Costo-efectividad (Medidas para el tratamiento de enfermedades cardiovasculares, VIH, enfermedades pulmonares, fracturas, etc.)
				Estrategias para aumentar los ingresos
			Operaciones	Uso de los recursos
				Diseño de rutas de atención
				Planeación de recursos
			RR HH	Requerimiento de personal
			Promoción	Costo-efectividad de las medidas de promoción.
			Prevención	Prevención (VIH, fracturas, obesidad, cáncer, tuberculosis, diabetes, enfermedades de salud mental, infecciones respiratorias)
			Calidad	Asequibilidad al sistema de salud

ACTOR	NIVEL DE DECISION	CAMPO APLICACIÓN	AREA DE APLICACIÓN	TEMAS ESPECIFICOS
				Aumento en la calidad y esperanza de vida asociado al padecimiento de enfermedades (aneurisma, isquemias)
		Control Estratégico	Financiero	Costo efectividad de medidas de prevención (malaria)
			Prevención	Propagación de enfermedades con tratamiento (vacunación, cesación de cigarrillo, pérdida de peso, estatinas y medicamentos de hipertensión, VIH, sarampión).
			Calidad	Control de factores de riesgo
			Operaciones	Examinar el uso de proveedores y la utilización de los servicios de salud.
			Promoción	Evaluación del impacto de medidas que favorecen la salud (enfermedades coronarias, consumo de sustancias psicoactivas).
EPS	Táctico	Planeación Táctica	Financiero	Selección de EPS por parte de los usuarios de los servicios de salud.
				Planeación de costos de operación (servicio de salud, cirugía de revascularización)
				Maximizar la utilidad de la EPS
				Evaluación costo-efectividad (diagnóstico del cáncer)
			Operaciones	Evaluación de programas de atención (atención domiciliaria)
				Rutas clínicas para atención de enfermedades o accidentes (fracturas)
				Asignación de citas médicas
			Logística	Utilización de recursos logísticos (ambulancias)
			Prevención	Programas de prevención de enfermedades o malas condiciones de salud (caries)
		Control Táctico	Operaciones	Identificación de mejoras a la prestación de servicios de salud (Tratamiento de los ACV)
IPS	Operativo	Programación	Financiero	Evaluación costo-efectividad de tratamientos (osteoporosis)

ACTOR	NIVEL DE DECISION	CAMPO APLICACIÓN	AREA DE APLICACIÓN	TEMAS ESPECIFICOS
				Costo de la programación de los pacientes en las diferentes facilidades (radiación)
			Operaciones	Programación de servicios (departamentos de emergencias, quirófanos, farmacias, clínicas oncológicas)
				Diseño de rutas de atención (diagnóstico de pacientes con ACV)
				Planeación de capacidad de unidades de atención (departamento de urgencias, cuidados intensivos)
			Logística	Ubicación de facilidades (Departamento de emergencias, atención domiciliaria)
			RR HH	Programación de la capacidad del personal médico (programación de turnos del personal de salud, requerimientos de cantidad de personal)
			Prevención	Progresión de enfermedades o infecciones
			Calidad	Impacto de la Programación de servicios médicos sobre la calidad del mismo (triage, servicios de emergencias, plantilla de personal)
				Rutas clínicas para la atención de las enfermedades (ataques isquémicos)
		Control Operativo	Financiero	Evaluación del costo de programación de operaciones (programación de visitas domiciliarias)
			Operaciones	Acceso a facilidades de salud (toma de exámenes médicos, derivación de pacientes entre áreas de un hospital)
				Identificación de los cuellos de botella del sistema
			Logística	Instalación de nuevas facilidades

Tabla 8 - Temas incluidos en la descripción de componentes principales

- **Software:** esta es la última opción del tercer módulo y presenta al usuario algunas de las opciones de software disponible en el mercado para la simulación, el usuario debe seleccionar de una lista desplegable la técnica de simulación de su interés,

automáticamente SETESSCO cargará en el campo Software el listado de las herramientas disponibles, el usuario puede seleccionar una de esas opciones y de esta manera ver en pantalla la descripción y el link donde puede acceder al software.

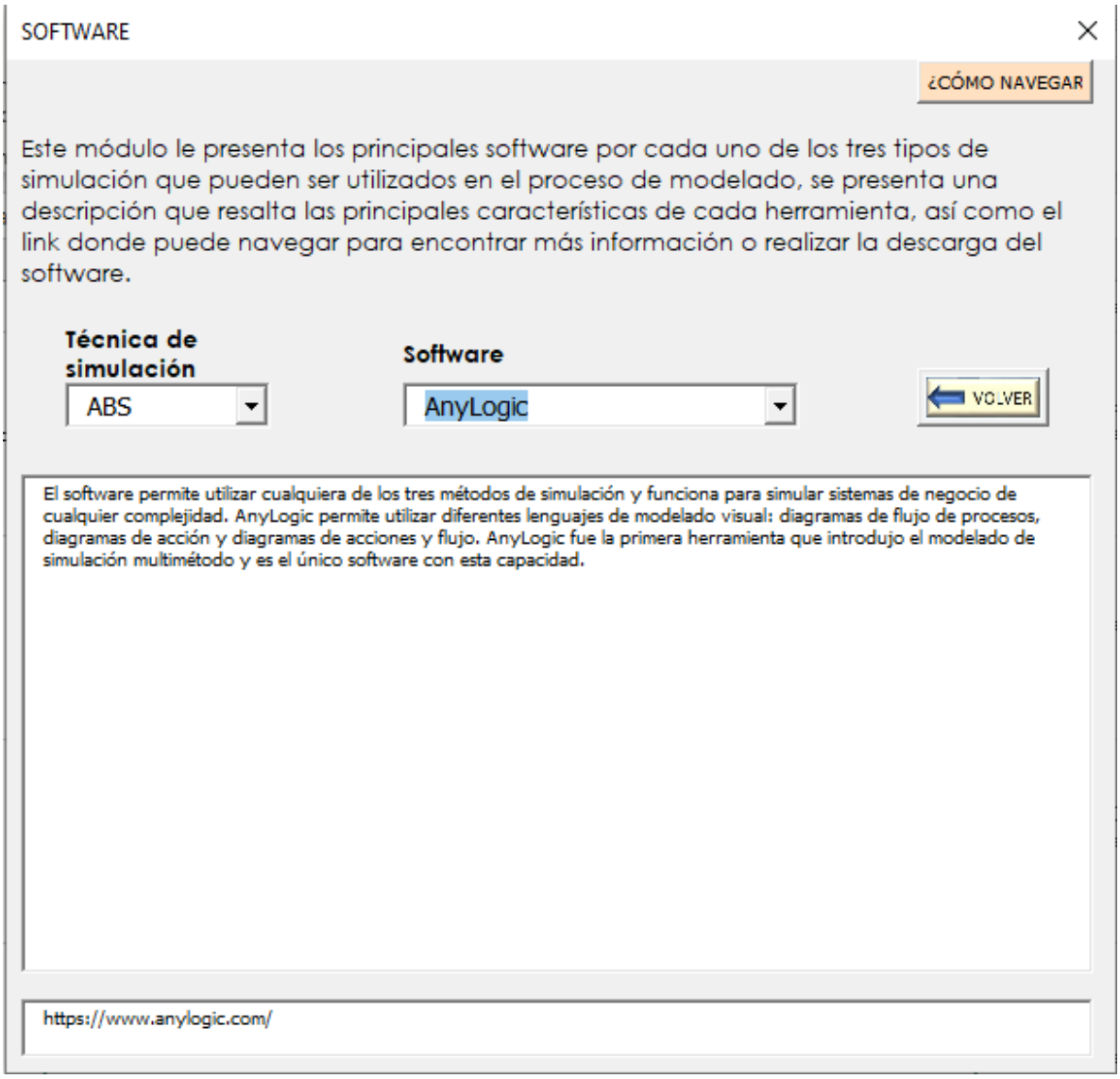
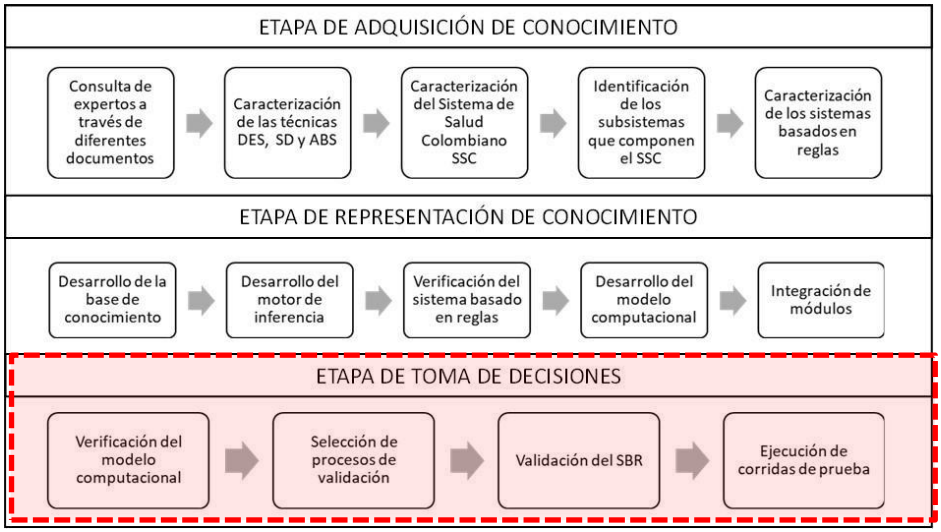


Ilustración 25 - Opción descripción de software

6. TOMA DE DECISIONES

Esta es la última etapa del modelo de inteligencia y consiste en la toma de decisiones, para este caso la decisión es la selección de la técnica de simulación más apropiada para el modelado de las problemáticas del sector salud.

Durante esta etapa se realiza la validación del modelo computacional, la validación permite asegurar que el prototipo de SETESSCO tiene las características correctas, es decir que permite una interacción adecuada con el usuario y que genera las salidas esperadas.



La validación del prototipo se realizó en primer lugar ejecutando las diferentes opciones de SETESSCO para comprobar el buen funcionamiento del aplicativo y posteriormente se sometió a pruebas con usuarios finales para confrontar la calidad y facilidad de su empleo.

Para cuantificar la percepción de los usuarios finales, se estableció una muestra de 43 estudiantes: 18 estudiantes de pregrado en Ingeniería Industrial y 25 estudiantes de Maestría en Ingeniería Industrial, que fueron los usuarios piloto del aplicativo, mediante una encuesta se les pidió evaluar el empleo de simulación en diferentes proyectos asociados al sistema de salud colombiano.

Se consideraron 50 proyectos del sector salud de los cuales 25 ya habían desarrollados y los otros 25 eran totalmente nuevos, cada estudiante debía decidir si la simulación era la herramienta adecuada para modelar la situación problémica directamente o si se podía utilizar como mecanismo de validación del proyecto de investigación, además de decidir la pertinencia sobre el uso de esta herramienta, los estudiantes debían pensar en la técnica de simulación (DES, SD y ABS) más apropiada para modelar la situación problémica del proyecto. Posteriormente, los estudiantes utilizaron SETESSCO y procedieron a responder una encuesta de 9 preguntas, las cuales son descritas en la tabla a continuación:

Id	Pregunta	Respuestas posibles
1	¿Qué grado de comprensión del problema a investigar tiene el estudiante? **Nota:** en caso de tener una baja comprensión se procedía a explicar de nuevo el objetivo del trabajo y si persistía esa baja comprensión se cambia el tema.	Alta (A), mediana (M) o baja (B)
2	¿Antes de emplear el aplicativo se tenía una idea de que técnica de simulación se debía implementar en su trabajo investigativo?	Si, No
3	Si la respuesta a la pregunta 2 es negativa, pase a la pregunta 4. ¿La técnica sugerida por el aplicativo coincide con la que originalmente usted pensaba?	Si, No
4	¿Tuvo dificultades con el manejo del aplicativo?	Si, No
5	¿Recomendaría el uso de este aplicativo?	Si, No
6	Valore de 1 a 10 la opción “Explorar el sistema de salud en Colombia”	Donde 1 es muy malo y 10 es excelente
7	Valore de 1 a 10 la opción “Modelos de simulación”	Donde 1 es muy malo y 10 es excelente
8	Valore de 1 a 10 la opción “Modelos de simulación”	Donde 1 es muy malo y 10 es excelente

Tabla 9 - Preguntas de la encuesta de validación

La primera pregunta hace referencia al grado de comprensión que tiene el estudiante sobre el problema de investigación, en la Ilustración 26 - Respuestas a las preguntas 1 y 2 se evidencia que el 35% de los estudiantes encuestados manifiestan tener un conocimiento alto del problema de investigación, el restante 65% de la muestra indica que su conocimiento sobre el problema de investigación es medio, ningún estudiante manifestó tener un bajo conocimiento del problema de investigación, el hecho que los estudiantes

tengan un grado de comprensión medio-alto del problema proporciona un mayor grado de confianza en el uso del aplicativo que pueden dar los estudiantes a SETESSCO. La segunda pregunta hace referencia al conocimiento que tienen los estudiantes sobre la técnica de simulación más apropiada para modelar el problema abordado en el trabajo de investigación, el gráfico de la parte derecha de la Ilustración 26 - Respuestas a las preguntas 1 y 2 indica que el 53% de los estudiantes creían saber la técnica de simulación a emplear en el caso teórico a desarrollar, esta es una medida a priori pues como es bien sabido si se tuviese que llevar a cabo en la realidad el proyecto investigativo se requiere de estudiar aún más el sistema y desde luego elaborar el estado de arte. Este resultado proporcionalmente es ligeramente mayor en los estudiantes de Maestría que en los estudiantes de pregrado, en este caso de los estudiantes de Maestría el 48% creía saber la técnica mientras que los estudiantes de pregrado el 45%.

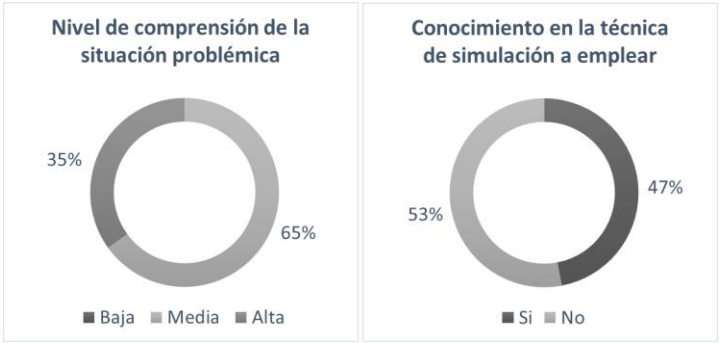


Ilustración 26 - Respuestas a las preguntas 1 y 2

La pregunta 3 fue contestada únicamente por aquellos estudiantes que manifestaron tener una idea sobre la técnica de simulación que debía implementar en el su trabajo de investigación antes de utilizar SETESSCO, la pregunta hace referencia a la coincidencia entre la técnica seleccionada por el estudiante y la técnica sugerida por SETESSCO, la Ilustración 27 - Respuesta a la pregunta 3 muestra que en el 84% de los casos la técnica seleccionada por el estudiante no corresponde a la técnica sugerida por SETESSCO.

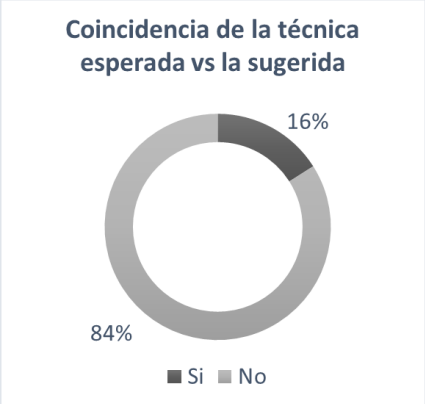


Ilustración 27 - Respuesta a la pregunta 3

Resulta interesante ver que a priori la técnica que se creía saber no coincide con la que arroja el aplicativo entendiendo que el no tener idea sobre la técnica a utilizar implica la no selección de ninguna técnica. Al contrario del caso anterior resulta ligeramente inferior el porcentaje de estudiantes de Maestría que acertaron (12%) frente a los de pregrado (22%).



Ilustración 28 – Respuesta a la pregunta 4

En cuanto a la facilidad en el uso del aplicativo, la Ilustración 28 – Respuesta a la pregunta 4 muestra que el 19% de los usuarios finales consideraron al principio que era difícil el uso del prototipo, esta dificultad se fundamenta en no conocer exactamente el nivel de la decisión del problema, ni el campo o el área de aplicación del mismo, esto desde luego dificulta el uso de SETESSCO, sin embargo, es una dificultad que está más asociada al grado de comprensión del problema que se quiere resolver, es importante resaltar que SETESSCO cuenta con un módulo dedicado a explicar en mayor detalle los niveles de

decisión, los campos y las áreas de los problemas del sector salud, lo que en cierta medida ayuda a mitigar esta dificultad. En el caso del uso de SETESSCO en la vida real es posible que este nivel de dificultad se vea reducido en gran parte debido a que los tomadores de decisiones o los interesados en modelar suelen tener un amplio conocimiento sobre el problema de su interés, es importante resaltar que SETESSCO es un prototipo susceptible de mejoras, lo que desde luego perfeccionará el prototipo en sus versiones posteriores.



Ilustración 29 - Respuesta a la pregunta 5

Finalmente, la respuesta a la pregunta 5 indican que el 95% de los usuarios recomendaría el uso de SETESSCO lo cual es un valor muy representativo ya que se considera que este aplicativo logra mejorar la comprensión del sistema y facilita el proceso de simulación.

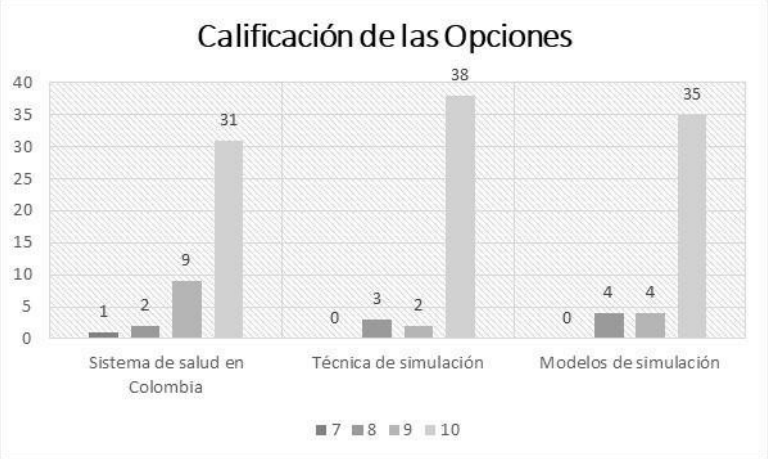


Ilustración 30 - Respuestas a las preguntas 6, 7 y 8

La segunda parte de la encuesta consistió en solicitar a los usuarios dar una calificación a cada uno de los módulos que componen SETESSCO, la Ilustración 30 - Respuestas a las preguntas 6, 7 y 8 presenta que la valoración es en promedio de 9,7 de 10 puntos posibles, resultado que está alineado con la respuesta a la pregunta 5, en el que el 95% de los estudiantes encuestados recomendaría el uso de SETESSCO.

La calificación para cada módulo se presenta a continuación: en el detalle el conocimiento del Sistema de Salud Colombiano la valoración promedio fue de 9,6; para la selección de la técnica de simulación a emplear fue de 9,8 y finalmente de los métodos de simulación fue de 9,7.

Como resultado de la encuesta podemos concluir que el prototipo de SETESSCO es una herramienta valiosa para en primer lugar proporcionar información relacionada con el sistema de salud en Colombia que le permita al tomador de decisiones y/o responsable de la simulación conocer aspectos relevantes del sistema de salud de tal manera que tenga el conocimiento para identificar el actor involucrado, el nivel de decisión, el área y el campo de aplicación del problema del sector salud que desea investigar, en segundo lugar, SETESSCO facilita el proceso de selección de la técnica de simulación a utilizar, lo que abre el camino al incremento del uso de la simulación para el diseño de políticas, planes, programas y la toma de decisiones tácticas y operativas.

7. CONCLUSIONES

SETESSCO es el prototipo de una herramienta computacional que soporta la toma de decisiones relacionadas con la selección de la técnica de simulación más apropiada para el modelado de problemáticas en el sector salud, este resultado se obtiene mediante la interacción entre el usuario y SETESSCO a través de un prototipo computacional el cual a mediante formularios le permite al usuario seleccionar los módulos que son de su interés, así como ingresar los parámetros que necesita el sistema para determinar la técnica de simulación más recomendada. La recomendación que realiza SETESSCO se logra gracias a un Sistema Basado en Reglas que identifica como principales criterios de agrupación y construcción los niveles de la decisión, los actores involucrados en el sistema, los campos de aplicación y las áreas en donde se puede implementar un proceso de simulación, todos estos criterios fueron estudiados y modelados por cada una de las diferentes perspectivas de simulación.

SETESSCO además de sugerir la técnica a implementar según el SBR, brinda información valiosa para ayudar al usuario a comprender mejor los componentes y el funcionamiento del SGSS a través de la descripción de los elementos que componen el Sistema de Salud en Colombia, los regímenes que se aplican, los principales actores del sistema, los niveles de decisión de SGSS, así como los campos y las áreas de aplicación de las problemáticas asociadas al sector salud; adicionalmente brinda un repositorio con la principal normativa relacionada con el Sistema de Salud Colombiano.

Por otro lado, SETESSCO también proporciona información valiosa al usuario sobre las principales metodologías de simulación que se pueden implementar según la técnica sugerida o simplemente le permite al usuario consultar la que sea de su interés en aras de fortalecer su conocimiento en metodologías de simulación, además de las metodologías, este prototipo presenta algunos de los componentes del modelo de simulación que se recomienda sean contemplados dentro del proceso de modelado, como lo son las medidas de desempeño y las variables de interés, adicionalmente, por cada tema específico se presenta un conjunto de artículos que pueden ser consultados por el usuario en aras de

ampliar su conocimiento sobre cómo utilizar la simulación para abordar su problema de investigación.

Finalmente, para suministrar más herramientas que faciliten el modelado al usuario, por cada técnica contemplada en el prototipo se incluye un listado de software que presenta la descripción y los links de consulta que le pueden facilitar al usuario su elección.

En este orden de ideas SETESSCO constituye una herramienta potencial que facilita a los investigadores y tomadores de decisión utilizar la simulación como herramienta para abordar las diferentes problemáticas del Sistema de Salud de Colombia de tal manera que se puedan diseñar política pública, definir estrategias, planes y programas, tomar decisiones operativas como el uso eficiente de los recursos y la infraestructura y en general cualquier tipo de iniciativa que pueda contribuir a cerrar la brecha que en nuestro país significa acceder a servicios de salud de calidad.

La tabla a continuación presenta los resultados alcanzados vs los objetivos planteados en el trabajo de investigación:

Objetivos	Resultados
Objetivo general: Desarrollar un sistema basado en reglas que permita determinar la técnica de simulación más recomendada y los principales componentes en el modelado del aspecto inherente al Sistema de Salud Colombiano seleccionado por el usuario	SETESSCO es un prototipo computacional basado en un SBR que permite mediante la interacción entre un usuario y unos formularios recomendar la técnica de simulación mpas apropiada para el modelado de problemas asociados al sector salud, así como los principales componentes del modelo que deben ser considerados.
Objetivo específico: Identificar los subsistemas que componen el Sistema de Salud en Colombia, sus elementos, variables, relaciones causales y comportamientos que constituirán la base del conocimiento del Sistema Basado en Reglas.	En su módulo “Explorar el Sistema de Salud en Colombia” SETESSCO presenta los actores, sus interacciones, los tipos de sistemas, niveles de decisión, campos y áreas de aplicación del Sistema de Salud en Colombia.
Determinar el conjunto de reglas que describen las relaciones existentes entre la información recolectada y que darán origen al mecanismo de inferencia del Sistema Basado en Reglas	SETESSCO utiliza un SBR para la inferencia de la técnica de simulación más apropiada, las 233 reglas fueron construidas mediante un árbol de decisión que utilizó en su entrenamiento y prueba

Objetivos	Resultados
	una base de conocimiento con 1.439 artículos científicos relacionados con modelos de simulación de problemáticas asociadas al sector salud.
Desarrollar una aplicación computacional que le permita al usuario de la misma interactuar con el Sistema Basado en Reglas	SETESSCO es un prototipo de aplicativo desarrollado en VBA que permite la interacción entre usuario y el SBR, esta interacción se da mediante el módulo "Seleccionar la Técnica de Simulación"
Indicar al usuario de la aplicación, la información que requiere tener disponible para desarrollar el proyecto de simulación mediante la técnica recomendada	SETESSCO suministra al usuario las medidas de desempeño y las variables de decisión que se sugieren sean consideradas para el modelado del problema de investigación a través del módulo "Modelos de Simulación" donde además puede encontrar información relevante sobre metodologías de simulación y software de simulación que puede implementar en su proceso de modelado.

Tabla 10 - Resultados asociados a los objetivos de la investigación

7.1 TRABAJOS FUTUROS

Como se ha hecho referencia a lo largo del desarrollo del presente trabajo de investigación SETESSCO es un prototipo, lo que implica que es susceptible a múltiples mejoras:

- Como se mencionó en el apartado Verificación del sistema basado en reglas las clases del conjunto de datos utilizado para el entrenamiento y la prueba del árbol de decisión no están balanceadas, por lo que se pueden generar nuevos clasificadores utilizando estrategias de penalización, modificando el conjunto de datos, utilizando otros clasificadores, etc. esto para mejorar las medidas de desempeño de la herramienta.
- El Sistema de Salud es un Sistema Complejo por lo que su evolución es constante, esto conlleva a que SETESSCO requiera estar en constante actualización, por ejemplo, de la nueva normativa que se emita en el país, la creación o eliminación de actores, modificaciones en los flujos de recursos financieros, etc.
- La actualización del conjunto de datos es fundamental para mejorar el aprendizaje computacional del árbol de decisión, por lo que una constante revisión de los nuevos

trabajos e investigaciones publicados en el campo de la simulación de problemas de investigación asociados al sector salud es de suma importancia.

- SETESSCO fue desarrollado en VBA mediante el uso de formularios, por lo que su interfaz si bien es amigable y de fácil manejo puede ser mejorada mediante el desarrollo de un aplicativo más robusto con un *front* mucho más llamativo, interactivo y estético que genere un mayor impacto en el usuario.

8. REFERENCIAS

ADRES. (2018). Administradora de los Recursos del Sistema General de Seguridad Social en Salud. Retrieved from https://www.adres.gov.co/La-Entidad/-Qué-es-la-ADRES

Alexander, L. (2004). Decision support systems in the 21st century. In *ACM SIGSOFT Software Engineering Notes* (Vol. 27). https://doi.org/10.1145/571681.571692

Alibrahim, A., & Wu, S. (2018). An agent-based simulation model of patient choice of health care providers in accountable care organizations. *Health Care Management Science*, *21*(1), 131–143. https://doi.org/10.1007/s10729-016-9383-1

Alvarado, M. M., Cotton, T. G., Ntaimo, L., & Pe, E. (2020). *Modeling and simulation of oncology clinic operations in discrete event system specification*. *94*(2), 105–121. https://doi.org/10.1177/0037549717708246

Álvarez Pomar, L. (2016). *MODELO DE INTELIGENCIA COLECTIVA DE LOS SISTEMAS PEATONALES*. 1–169.

Anderson, G. H., Jenkins, P. J., Mcdonald, D. A., Meer, R. Van Der, Morton, A., Nugent, M., & Rymaszewski, L. A. (2017). *Cost comparison of orthopaedic fracture pathways using discrete event simulation in a Glasgow hospital*. 1–12. https://doi.org/10.1136/bmjopen-2016-014509

Asamoah, D. A., Sharda, R., Rude, H. N., & Doran, D. (2018). RFID-based information visibility for hospital operations: exploring its positive effects using discrete event simulation. *Health Care Management Science*, *21*(3), 305–316. https://doi.org/10.1007/s10729-016-9386-y

Augusto, V., & Xie, X. (2014). *A modelling and simulation framework for health care systems . HAL Id : hal-00937523*. (January). https://doi.org/10.1109/TSMC.2013.2239640

Banks, J. (2005). *Discrete-Event System Simulation*.

Baril, C., Gascon, V., & Cartier, S. (2014). Computers & Industrial Engineering Design and analysis of an outpatient orthopaedic clinic performance with discrete event simulation and design of experiments. *Computers & Industrial Engineering*, *78*, 285–298. https://doi.org/10.1016/j.cie.2014.05.006

Carlos, J., Instructor, E. C., Pública, D. S., & Medicina, F. De. (2001). El sistema general de seguridad social en salud. *Revista de La Facultad de Medicina Universidad Nacional*, *49*(1), 283–287. Retrieved from http://revistas.unal.edu.co/index.php/revfacmed/article/view/19730/20813

Castillo, E., Guti, M., & Castillo, E. (1997). *Sistemas Expertos y Modelos de Redes Probabilísticas*.

Chemweno, P., Thijs, V., Pintelon, L., & Horenbeek, A. Van. (2014). Simulation Modelling Practice and Theory Discrete event simulation case study : Diagnostic path for stroke patients in a stroke unit. *Simulation Modelling Practice and Theory*, *48*, 45–57. https://doi.org/10.1016/j.simpat.2014.07.006

Devapriya, P., Strömblad, C. T. B., Bailey, M. D., Frazier, S., Bulger, J., Kemberling, S. T., & Wood, K. E. (2015). *StratBAM : A Discrete-Event Simulation Model to Support Strategic Hospital Bed Capacity Decisions*. https://doi.org/10.1007/s10916-015-0325-0

García-Valdecasas Medina, J. I. (2011). La simulación basada en agentes: una nueva forma de explorar los fenómenos sociales. *Revista Española de Investigaciones*

Sociológicas, *136*, 91–109. https://doi.org/10.5477/cis/reis.136.91

Gocgun, Y. (2018). Simulation-based approximate policy iteration for dynamic patient scheduling for radiation therapy. *Health Care Management Science*, *21*(3), 317–325. https://doi.org/10.1007/s10729-016-9388-9

Guerrero, R., Gallego, A., Becerril-Montekio, V., & Vásquez, J. (2011). Sistema de salud en Colombia. *Salud Publica Mex*, *53*(Suppl 2), s144–s155. https://doi.org/10.1590/S0036-36342011000500003

Herazo Acuña, B. (2010). Algunos problemas de la salud en Colombia. *Dossier Salud Pública y Epidemiología En Odontología*, *29*(63), 37–39.

Iglesias, E. B., & Molina, W. B. (2018). *Sistema de Evaluación y Calificación de Actores : Ranking de Satisfacción EPS 2018 Oficina de Calidad on de Actores :*

In, D., Disease, C., & Health, P. (2013). *THE 3 E ' s PUBLIC HEALTH : ENGINEERING , EVOLUTION AND EFFECTIVENESS*. (June).

Instituto Nacional de Salud. (2011). *Instituto Nacional de Salud*. Retrieved from https://www.ins.gov.co/conocenos/objeto-y-funciones

INVIMA. (2011a). INVIMA. Retrieved from https://www.invima.gov.co/nuestra-entidad.html

INVIMA. (2011b). INVIMA. Retrieved from https://www.invima.gov.co/nuestra-entidad/mapa-de-procesos.html

Iqbal, S., Altaf, W., Aslam, M., Mahmood, W., & Khan, M. U. G. (2016). Application of intelligent agents in health-care: review. *Artificial Intelligence Review*, *46*(1), 83–112. https://doi.org/10.1007/s10462-016-9457-y

Isern, D., & Moreno, A. (2016). A Systematic Literature Review of Agents Applied in Healthcare. *Journal of Medical Systems*, *40*(2), 1–14. https://doi.org/10.1007/s10916-015-0376-2

IZQUIERDO, LUIS R.; GALÁN, JOSÉ M.; SANTOS, JOSÉ I.; DEL OLMO, R. (2008). *Modelado de sistemas complejos mediante simulación basada en agentes y mediante dinámica de sistemas*.

Kaushal, A., Zhao, Y., Peng, Q., Strome, T., Weldon, E., Zhang, M., & Chochinov, A. (2015). Evaluation of fast track strategies using agent-based simulation modeling to reduce waiting time in a hospital emergency department. *Socio-Economic Planning Sciences*, *50*, 18–31. https://doi.org/10.1016/j.seps.2015.02.002

Kendall, K. E., & Kendall, J. E. (2005). *ANÁLISIS Y DISEÑO DE SISTEMAS* (SEXTA).

Kittipittayakorn, C., & Ying, K. C. (2016). Using the integration of discrete event and agent-based simulation to enhance outpatient service quality in an orthopedic department. *Journal of Healthcare Engineering*, *2016*. https://doi.org/10.1155/2016/4189206

Kruzikas, D. T., Higashi, M. K., Edgar, M., Macal, C. M., North, M. J., Graziano, D. J., & Collier, N. T. (2014). Using agent-based modeling to inform regional health care system investment and planning. *Proceedings - 2014 International Conference on Computational Science and Computational Intelligence, CSCI 2014*, *2*, 211–214. https://doi.org/10.1109/CSCI.2014.120

Law, A. M., & Kelton, W. D. (1991). Simulation modeling and analysis. In *McGrawHill New York LÕEcuyer P Giroux N Glynn PW* (Vol. 2). https://doi.org/10.1145/1667072.1667074

Lebcir, R., Demir, E., Ahmad, R., Vasilakis, C., & Southern, D. (2017). A discrete event simulation model to evaluate the use of community services in the treatment of patients with Parkinson ' s disease in the United Kingdom. *BMC Health Services Research*, 1–14. https://doi.org/10.1186/s12913-017-1994-9

Leykum, L. K., Lanham, H. J., Pugh, J. A., Parchman, M., Anderson, R. A., Crabtree, B. F., … Jr, R. R. M. (2014). Manifestations and implications of uncertainty for improving healthcare systems ... complexity science. *Implementation Science : IS*, 1–13.

Liu, Z., Rexachs, D., Epelde, F., & Luque, E. (2017). An agent-based model for quantitatively analyzing and predicting the complex behavior of emergency departments. *Journal of Computational Science*, *21*, 11–23. https://doi.org/10.1016/j.jocs.2017.05.015

Lopes, M. A., Almeida, Á. S., & Almada-Lobo, B. (2018). Forecasting the medical workforce: a stochastic agent-based simulation approach. *Health Care Management Science*, *21*(1), 52–75. https://doi.org/10.1007/s10729-016-9379-x

Marshall, D. A., Burgos-liz, L., Eng, I., Ijzerman, M. J., Crown, W., Padula, W. V, … Osgood, N. D. (2015). *Selecting a Dynamic Simulation Modeling Method for Health Care Delivery Research — Part 2 : Report of the ISPOR Dynamic Simulation Modeling Emerging Good Practices Task Force*. *18*, 147–160.

Marshall, D. A., Burgos-liz, L., Eng, I., Ijzerman, M. J., Osgood, N. D., Padula, W. V, … Crown, W. (2015). Applying Dynamic Simulation Modeling Methods in Health Care Delivery Research — The SIMULATE Checklist : Report of the ISPOR Simulation Modeling Emerging Good Practices Task Force. *Value in Health*, *18*(1), 5–16. https://doi.org/10.1016/j.jval.2014.12.001

Marshall, D. A., Burgos-Liz, L., IJzerman, M. J., Crown, W., Padula, W. V., Wong, P. K., … Osgood, N. D. (2015). Selecting a Dynamic Simulation Modeling Method for Health Care Delivery Research—Part 2: Report of the ISPOR Dynamic Simulation Modeling Emerging Good Practices Task Force. *Value in Health*, *18*(2), 147–160. https://doi.org/10.1016/j.jval.2015.01.006

Mendez G., G. A., Álvarez P., L., Centeno, M. A., & Baesler A., F. (2015). *Introducción a la Simulación Discreta*.

Meng, H. M. (2018). *Using simulation to assess the impacts of the adoption of a fast-track system for hospital emergency services*. *12*(3), 1–11. https://doi.org/10.1299/jamdsm.2018jamdsm0073

Ministerio de Salud y Protección Social. (n.d.-a). Retrieved from https://www.minsalud.gov.co/proteccionsocial/regimensubsidiado/paginas/aseguramiento-al-sistema-general-salud.aspx

Ministerio de Salud y Protección Social. (n.d.-b). Retrieved from https://www.minsalud.gov.co/Ministerio/Institucional/Paginas/mision-vision-principios.aspx

Ministerio de Salud y Protección Social. (2014). *Aseguramiento al Sistema General de Seguridad Social en Salud*. 61. Retrieved from https://www.minsalud.gov.co/sites/rid/Lists/BibliotecaDigital/RIDE/VP/DOA/ASL/cartilla__ movilidad.pdf

Ministerio de Salud y Protección Social. (2018a). DATOS ABIERTOS. Retrieved from https://www.datos.gov.co/Salud-y-Protecci-n-Social/Comunidad-salud-directorio-secretarias-de-salud/ideb-ck93

Ministerio de Salud y Protección Social. (2018b). *DATOS ABIERTOS Gobierno digital de Colombia*. Retrieved from https://www.datos.gov.co/Salud-y-Protecci-n-Social/Relaci-n-de-IPS-p-blicas-y-privadas-seg-n-el-nivel/s2ru-bqt6

Modelling, T. U. K., & Network, H. (2014). *CHANGE BY DESIGN: SYSTEMS MODELLING AND SIMULATION IN HEALTHCARE Tools for health service decision makers*.

Mukundan, S., & Ramani, S. (2007). *A Practical Introduction to Rule Based Expert Systems*

A Practical Introduction to Rule Based Expert Systems. (January).

Nieuwenhuyse, V. (2015). *A DECISION SUPPORT SYSTEM FOR CAPACITY PLANNING IN EMERGENCY DEPARTMENTS*. *14*, 299–312. https://doi.org/10.2507/IJSIMM14(2)10.308

OMS. (2005). ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD.

Ostermann, T. (2015). Agent-based modelling for simulating patients flow in a community hospital. *8th International Conference on Health Informatics, HEALTHINF 2015*, 14–19. https://doi.org/10.5220/0005178100140019

Pförringer, D., Breu, M., Crönlein, M., Kolisch, R., & Kanz, K. G. (2018). Closure simulation for reduction of emergency patient diversion: A discrete agent-based simulation approach to minimizing ambulance diversion. *European Journal of Medical Research*, *23*(1), 1–8. https://doi.org/10.1186/s40001-018-0330-0

Pinto, L. R., Silva, P. M. S., & Young, T. P. (2015). Simulation Modelling Practice and Theory A generic method to develop simulation models for ambulance systems. *Simulation Modelling Practice and Theory*, *51*, 170–183. https://doi.org/10.1016/j.simpat.2014.12.001

Pitt, M., Monks, T., Crowe, S., & Vasilakis, C. (2016). Systems modelling and simulation in health service design, delivery and decision making. *BMJ Quality & Safety*, *25*(1), 38–45. https://doi.org/10.1136/bmjqs-2015-004430

Prgho, S., Vlpxodwlrqv, D. Q. G., Dqdo, Z. H., Uhdo, H. G. D., Ri, F., Lvodqgv, U., … Wdnlqj, R. U. (2017). *3Urfhhglqjv Ri Wkh :Lqwhu 6Lpxodwlrq &Rqihuhqfh : . 9 &Kdq $ ' $Peurjlr * =Dfkduhzlf] 1 0Xvwdihh * :Dlqhu Dqg (3Djh Hgv*. 4550–4551.

Quezada, A., & Canesa, E. (2010). Modelado basado en agentes: Una herramienta para complementar el análisis de fenómenos sociales. *Avances En Psicologia Latinoamericana*, *28*(2), 226–238.

Ramos Mateus, K. T. (2013). *La responsabilidad social empresarial de las entidades del sector salud: descripción y análisis crítico de la RSE en los códigos de buen gobierno, ética y conducta de las principales entidades promotoras de salud Colombianas*. 58. Retrieved from http://www.bdigital.unal.edu.co/11163/

Sarno, D., & Elena, M. (2016). Daily nurse requirements planning based on simulation of patient flows. *Flexible Services and Manufacturing Journal*, *28*(3), 526–549. https://doi.org/10.1007/s10696-015-9231-5

Sauter, V. (2010). *Decision Support Systems for Business Intelligence* (Second). Retrieved from https://books.google.com.co/books?id=t09YBAAAQBAJ&printsec=frontcover&dq=support+decision+system&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwjDnI3Ehv7gAhUPXa0KHcKSCoI4ChDoAQhhMAg#v=onepage&q&f=false

Senn, J. A. (1992). *ANÁLISIS Y DISEÑO DE SISTEMAS DE INFORMACIÓN* (Segunda).

Silverman, B. G., Hanrahan, N., Bharathy, G., Gordon, K., & Johnson, D. (2015). A systems approach to healthcare: Agent-based modeling, community mental health, and population well-being. *Artificial Intelligence in Medicine*, *63*(2), 61–71. https://doi.org/10.1016/j.artmed.2014.08.006

Song, Z.-C., Ge, Y.-Z., Duan, H., & Qiu, X.-G. (2016). Agent-based simulation systems for emergency management. *International Journal of Automation and Computing*, *13*(2), 89–98. https://doi.org/10.1007/s11633-016-0958-6

Sterman, J. (2014). *Massachusetts Institute of Technology*. (January 2000).

Sterman J. D. (2000). *Systems Thinking and Modeling for a Complex World*.

Superintendencia Nacional de Salud. (2018). Instituciones Prestadoras de Servicios de Salud. *Mapa Georeferenicado de IPS*, *2018*(16), 1–22.

Superintendencia Nacional de Salud. (2019). Supersalud. Retrieved from https://www.supersalud.gov.co/es-co/

Thorwarth, M. (2009). *Application of Discrete-Event Simulation in Health Care : a Review*. 0–32.

Tien, J. M., & Goldschmidt-Clermont, P. J. (2009). Healthcare: A complex service system. *Journal of Systems Science and Systems Engineering*, *18*(3), 257–282. https://doi.org/10.1007/s11518-009-5108-z

Tracy, M., Cerdá, M., & Keyes, K. M. (2018). Agent-Based Modeling in Public Health: Current Applications and Future Directions. *Ssrn*. https://doi.org/10.1146/annurev-publhealth-040617-014317

Turban, E., Aronson, J. E., & Liang, T.-P. (2005). Decision Support Systems and Intelligent Systems (7th Ed). *Fenxi Huaxue*, *32*(10). https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004

Vargas, J. M., & Giraldo, J. A. (2014). Modelo de predicción de costos en servicios de salud soportado en simulación discreta. *Informacion Tecnologica*, *25*(4), 175–184. https://doi.org/10.4067/S0718-07642014000400019

Wang, J., Tian, J., & Sun, R. (2018). *Emergency Healthcare Resource Requirement Analysis : A Stochastic Timed Petri Net Approach*. 0–5.

Wang, X., Sun, Y., Mu, X., Guan, L., & Li, J. (2015). How to improve the equity of health financial sources ? - Simulation and analysis of total health expenditure of one Chinese province on system dynamics. *International Journal for Equity in Health*, 1–10. https://doi.org/10.1186/s12939-015-0203-x

Xie, Z., & Wang, C. (2017). A periodic repair algorithm for dynamic scheduling in home health care using agent-based model. *Proceedings of the 2017 IEEE 21st International Conference on Computer Supported Cooperative Work in Design, CSCWD 2017*, 245–250. https://doi.org/10.1109/CSCWD.2017.8066702

Yousefi, M., & Ferreira, R. P. M. (2017). An agent-based simulation combined with group decision-making technique for improving the performance of an emergency department. *Brazilian Journal of Medical and Biological Research*, *50*(5), 1–10. https://doi.org/10.1590/1414-431X20175955