

**Evaluación de una metodología para la aceleración de actividades con base  
en la relación tiempo – costo en un proyecto de obra civil**

Carlos Eduardo Urrea García

Linda Maciel Salas Ortiz



Universidad del Valle  
Facultad de ingeniería  
Palmira Valle del Cauca

2019

**Evaluación de una metodología para la aceleración de actividades con base  
en la relación tiempo – costo en un proyecto de obra civil**

Carlos Eduardo Urrea García

Linda Maciel Salas Ortiz

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de:

**Ingeniero Industrial**

Director:

Msc. Álvaro Julio Cuadros

Universidad del Valle

Facultad de ingeniería

Palmira Valle del Cauca

2019

## **AGRADECIMIENTOS**

*Agradezco a Dios por ser mi guía a lo largo de mi existencia, y, por ser fortaleza en los momentos de dificultad.*

*A mis padres por su amor incondicional, por ser los principales motores de mis sueños, por confiar y creer en mí y en especial por todo el apoyo y sacrificio hecho por mí.*

*A mi hermana Angie, por su cariño y apoyo incondicional durante este proceso.*

*A mi novio por sus consejos, motivación y apoyo sinigual a lo largo de mi etapa universitaria.*

*Por extender su mano en los momentos difíciles y por el amor brindado cada día. Sin su ayuda no hubiera sido posible lograr esta meta.*

*Al profesor Álvaro Cuadros, por su compromiso, dedicación y constancia en la realización de este trabajo de grado.*

*Finalmente, gracias a todas las personas que directa o indirectamente hicieron este sueño posible.*

*Linda Maciel Salas Ortiz*

*Agradezco a Dios por ser mi guía, mi protección y por ayudar a formar en mí los valores que hoy tengo como persona.*

*A mi madre y a mi padre por ser mi apoyo incondicional, por sus consejos, su confianza, su paciencia y su gran amor ya que sin ellos esto no sería posible.*

*A mi primo Miguel por sus enseñanzas, su ejemplo y su apoyo a lo largo de este de proceso.*

*A mi novia por su paciencia, por apoyarme en los momentos difíciles, por brindarme su amor y su compañía y hacer de la vida una experiencia mucho más bella y alegre.*

*Al profesor Álvaro Cuadros por su orientación, su tiempo y su apoyo en el desarrollo de este trabajo de grado.*

*A mi familia y amigos que permitieron que esto hoy sea una realidad, infinitas gracias.*

*Carlos Eduardo Urrea García*

## TABLA DE CONTENIDO

<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>8</b>
<b>1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</b> .....	<b>10</b>
<b>2 OBJETIVOS</b> .....	<b>13</b>
2.1 OBJETIVO GENERAL .....	13
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS:.....	13
<b>3 MARCO TEÓRICO</b> .....	<b>14</b>
3.1 ANTECEDENTES.....	14
3.2 MARCO CONCEPTUAL.....	16
<b>4 PROPUESTAS METAHEURÍSTICAS PARA LA ACELERACIÓN DE PROYECTOS</b> .....	<b>19</b>
4.1 OPTIMIZACIÓN DE COLONIA DE HORMIGAS .....	20
4.2 ALGORITMOS GENÉTICOS .....	24
4.3 BÚSQUEDA TABÚ .....	31
4.4 OPTIMIZACIÓN DE ENJAMBRE DE PARTÍCULAS .....	32
<b>5 METODOLOGÍA PROPUESTA PARA LA ACELERACIÓN DE ACTIVIDADES EN UN PROYECTO DE OBRA CIVIL</b> .....	<b>34</b>
5.1 FASE 1. DEFINICIÓN DE PARÁMETROS PARA EL MODELO.....	36
5.1.1 <i>Notación utilizada</i> .....	36
5.1.2 <i>Distribución para la duración de las actividades</i> .....	37
5.1.3 <i>Ajuste de parámetros</i> .....	37
5.2 FASE 2. DETERMINACIÓN DE LA RUTA MÁS CRÍTICA .....	38
5.3 FASE 3. DETERMINACIÓN DE LAS ACTIVIDADES A ACELERAR .....	39
5.3.1 <i>Estrategias para cada actividad</i> .....	39
5.3.2 <i>Formulación matemática</i> .....	39
5.3.3 <i>Optimización de colonia de hormigas</i> .....	42
<b>6 CONTEXTUALIZACIÓN</b> .....	<b>46</b>

6.1	CASO DE ESTUDIO: CONSTRUCCIÓN DE UNA CARRETERA EN PALMIRA, VALLE .....	46
6.2	PERFIL DE EXPERTOS.....	51
<b>7</b>	<b>APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA EN EL CASO DE ESTUDIO .....</b>	<b>52</b>
7.1	FASE 1. DEFINICIÓN DE PARÁMETROS PARA EL MODELO.....	52
7.1.1	<i>Notación utilizada.....</i>	<i>52</i>
7.1.2	<i>Distribución para la duración de las actividades .....</i>	<i>53</i>
7.1.3	<i>Ajuste de parámetros ACO .....</i>	<i>56</i>
7.2	FASE 2. DETERMINACIÓN DE LA RUTA MÁS CRÍTICA .....	58
7.3	FASE 3. DETERMINACIÓN DE LAS ACTIVIDADES A ACELERAR .....	60
7.3.1	<i>Estrategias para cada actividad.....</i>	<i>60</i>
7.3.2	<i>Formulación matemática.....</i>	<i>60</i>
7.3.3	<i>Optimización colonia de hormigas .....</i>	<i>61</i>
7.4	RESULTADOS DEL MODELO .....	61
7.4.1	<i>Primera etapa .....</i>	<i>62</i>
7.4.2	<i>Segunda etapa.....</i>	<i>68</i>
7.4.2.1	<b>Escenario 1.....</b>	<b>68</b>
7.4.2.2	<b>Segundo escenario.....</b>	<b>69</b>
<b>8</b>	<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>71</b>
<b>9</b>	<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>73</b>

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Costos y duraciones planeadas de las actividades.....	47
Tabla 2. Perfil de expertos consultados.....	51
Tabla 3. Notación utilizada en el desarrollo del modelo.....	53
Tabla 4. Normalización de actividades desarrolladas en forma normal. Promedio de expertos.....	54
Tabla 5. Normalización de actividades desarrolladas en forma acelerada. Promedio de expertos.....	55
Tabla 6. Índices de criticidad para las actividades del proyecto.....	58
Tabla 7. Resultados de la aplicación del modelo.....	63
Tabla 8. Estrategias seleccionadas por el algoritmo ACO.....	63
Tabla 9. Comportamiento de los resultados tras acelerar actividades en las diferentes rutas.....	67
Tabla 10. Comportamiento del costo y las actividades a acelerar para diferentes niveles de CL y Td=55.....	68
Tabla 11. Comportamiento del costo y las actividades a acelerar para diferentes niveles de CL y Td=67.....	70

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Fases metodología propuesta .....	35
Figura 2. Estructura de la vía.....	47
Figura 3. Diagrama de red construcción de vía. ....	50

## INTRODUCCIÓN

La gerencia de proyectos trata de dar el mejor uso a los recursos para que un proyecto pueda ser terminado durante el tiempo, el alcance y el costo planificados en su inicio. De lo anterior, se puede concluir que la finalidad de la gerencia de proyectos es lograr que dicho proyecto sea exitoso y esto se logra por medio de diferentes técnicas y habilidades.

Ahora bien, dentro de la gerencia de proyectos se puede encontrar el control de proyectos que según (Project Management Institute, 2013) se encarga de revisar constantemente que el desempeño real del proyecto cumpla con el desempeño planeado y en caso de que se presenten variaciones recomendar acciones correctivas.

Sin embargo, teniendo como criterios de corto plazo el costo, el tiempo y el alcance muchos proyectos de obras civiles en Colombia han tenido problemas como se podrá evidenciar con algunos ejemplos más adelante en el planteamiento del problema.

Sumado a esto, las consecuencias o efectos que presentan los retrasos en los proyectos de obras civiles pueden generar un impacto social negativo afectando a la comunidad de los alrededores donde se presentan dichas obras y un aumento importante en los costos.

Teniendo en cuenta lo anterior, este trabajo se centrará en el control de proyectos, más específicamente en la aceleración de actividades buscando técnicas o herramientas que permitan compensar los costos del proyecto y los de acelerar con la duración del mismo, esto se hace necesario cuando un proyecto esta retrasado o cuando existe la necesidad de terminar antes de lo planificado.

El presente trabajo está conformado por cuatro partes, la primera se compone de los tres primeros capítulos en los cuales se contextualiza e introduce los



antecedentes del trabajo. En el primer capítulo se presenta el planteamiento del problema, en el segundo se definen los objetivos y en el tercer capítulo se muestra el marco teórico sobre las herramientas y los antecedentes aplicadas en la aceleración de proyectos.

En la segunda parte que corresponde al cuarto capítulo se expone la caracterización de algunas propuestas metodológicas metaheurísticas utilizadas para la aceleración de actividades identificadas en la literatura revisada. La tercera parte corresponde al capítulo 5 y presenta las fases que componen la metodología escogida para la aceleración de actividades en el presente trabajo de grado.

La última parte corresponde a los capítulos 6 y 7 donde se presenta la información del caso de estudio desarrollado en la ciudad de Palmira y la aplicación de la metodología propuesta en el caso. Por último, se muestran las conclusiones.

## 1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En Colombia el sector construcción está dividido en dos subsectores: Edificaciones y Obras Civiles.

Según (CAMACOL, 2017) el subsector edificaciones agrupa edificaciones residenciales tanto a nivel rural como urbano, edificios no residenciales, reparación de edificios, mantenimiento y alquiler de equipos de construcción, mientras que el subsector de obras civiles agrupa los trabajos asociados con la ingeniería civil, como la construcción de carreteras, vías férreas, puertos y tuberías.

En lo relacionado con las obras civiles según la clasificación central de productos estas se agrupan en: 4001 carreteras, calles, caminos puentes, túneles y construcciones de subterráneos; 4002 vías férreas, pistas de aterrizaje y sistemas de transporte masivo; 4003 vías de agua, puertos, represas, acueductos, alcantarillado y otras obras portuarias 4004 construcciones para la minería y centrales generadoras eléctricas y tuberías para el transporte a larga y corta distancia, líneas de comunicación y energía (cables); 4008 otras obras de ingeniería (DANE, 2015).

La construcción de obras de ingeniería civil es una actividad económica que incide en el crecimiento y desarrollo de un país.

Al analizar el valor agregado del sector construcción al PIB en Colombia para el segundo trimestre del 2017, se observa un aumento del 0,3% debido a la disminución de 7,4% en el valor agregado del subsector edificaciones y el aumento de 6,5% en el subsector de obras civiles.

Asimismo, con respecto al trimestre anterior el sector construcción fue uno de los sectores con más crecimiento contrastado con el sector de industria manufacturera que registro la mayor caída (DANE, 2017).

En este sentido, un factor importante en el desarrollo de un país es el progreso de obras civiles eficientes que contribuyan al avance del mismo; sin embargo, en Colombia se presentan constantes incumplimientos en este tipo de obras.

Dichos incumplimientos pueden evidenciarse en retrasos que conllevan a la entrega no oportuna de las mismas. Por ejemplo, en Bogotá a marzo de 2016 el Comando de la Policía, en el cual se pagaron más de 31.000 millones de pesos de los 42.000 millones que estaban destinados para esta obra, la construcción se encontraba pausada hace 14 meses y estaba proyectada para entregarse en el 2012 (El Tiempo, 2016).

Del mismo modo, otros ejemplos de obras que presentan retrasos en tiempos de entrega y con sobrecostos son: el Poblado: Transversal inferior con los Balsos en Medellín; la cual debía ser entregada en septiembre del 2015 y se entregó 8 meses después, el costo inicial de dicha obra era de 9.800 millones y este se duplicó a 19.800 millones (Caracol Radio, 2017).

Por otro lado, está el Parque Lineal Rio Cali el cual estaba planeado que se demoraría 8 meses y se extendió hasta 26 meses, los costos iniciales eran de 19.500 millones, pero el costo final de dicha obra es de 28.650 millones (Caracol Radio, 2017).

Con base en lo anterior se puede evidenciar una fuerte problemática relacionada con los plazos y costos de los proyectos. Ahora bien, estos problemas pueden ser ocasionados por parte de los clientes, en particular, con lo relacionado a datos necesarios para diseñar que muchas veces no son fáciles de obtener (Díaz Martín, 2010).

Sin embargo, muchas veces el responsable de los retrasos es el mismo proyectista, ya que estos no invierten los recursos necesarios para la planificación ocasionando que sea deficiente.(Carcaño, Delgadillo, & Fajardo, 2009).

En consecuencia, se hace necesario controlar el proyecto, recabar con regularidad datos sobre el desempeño de este, comparar el desempeño real con el planeado, y emprender de inmediato acciones correctivas en caso de que el desempeño real esté rezagado con respecto al planeado.

La administración de proyectos es un método proactivo para controlar un proyecto de modo que se asegure el logro del objetivo del proyecto, incluso cuando las cosas no resultan según lo planeado (Tobergte & Curtis, 2013).

En efecto, un responsable de la toma de decisiones en un proyecto puede decidir acortar el tiempo de finalización del mismo buscando minimizar el costo total, por medio de la disminución de la duración de actividades críticas logrando así ahorros en costos indirectos y aumentando los gastos directos por acelerar(Xu, Zheng, Zeng, Wu, & Shen, 2012).

Es en este sentido que surge la pregunta: ¿Qué metodología se puede aplicar para la aceleración de actividades en un proyecto que permita cumplir con los tiempos establecidos minimizando el costo total?

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 Objetivo general

Evaluar una propuesta metodológica para la aceleración de actividades en un proyecto de obra civil teniendo en cuenta la relación tiempo – costo.

### 2.2 Objetivos específicos:

- ✓ Caracterizar métodos metaheurísticos utilizados para acelerar actividades de un proyecto mediante revisión bibliográfica.
- ✓ Adaptar una metodología para la aceleración de actividades en un proyecto de obra civil.
- ✓ Validar la metodología propuesta con un caso de estudio.

### 3 MARCO TEÓRICO

El tiempo y el costo son dos aspectos importantes en la planeación de un proyecto de construcción, ya que muchas decisiones en la gestión del proyecto van encaminadas a minimizar el costo y la duración del mismo, ya que el entorno competitivo actual exige para estos una planificación y programación eficiente (Ghoddousi, Eshtehardian, Jooybanpour, & Javanmardi, 2013; Xu et al., 2012). La estimación del costo y el tiempo de las actividades normalmente se realiza antes de iniciar el proyecto lo que recae en una precisión limitada para estos ya que existen diversos factores que pueden afectar los tiempos y costos de las actividades (Yang, 2011). El análisis de aceleración del proyecto o problema de compensación tiempo – costo se refiere a disminuir la duración total del proyecto al acelerar algunas actividades críticas a un costo adicional. El objetivo de este es entonces reducir la duración del proyecto al mismo tiempo que se minimiza el costo con el fin de compensar estas dos variables (Göçken, 2013).

Sin embargo, existen diferentes medios para la aceleración de un proyecto. Según (Gerk & Qassim, 2008) un proyecto puede acelerarse en tres modos: crashing, el cual implica la asignación de más recursos a una actividad de lo que se había planeado originalmente; superposición lo que implica el inicio de una actividad antes de que uno o más de sus predecesores haya finalizado y la sustitución implica el reemplazo de una actividad por otra actividad, como en el caso de utilizar una tecnología diferente en comparación con la planeación original.

#### 3.1 Antecedentes

El problema de compensación tiempo – costo (TCTP) precisa encontrar soluciones para el desarrollo de las actividades en un proyecto que permitan encontrar un equilibrio entre el tiempo y el costo de este. Dicho problema aparece a menudo, cuando la duración de un proyecto necesita acortarse para compensar retrasos o cuando se hace necesario completar un proyecto antes de una fecha predeterminada (Mokhtari, Baradaran Kazemzadeh, & Salmasnia, 2011).

Como se cita en (Kalhor, Khanzadi, Eshtehardian, & Afshar, 2011), los primeros enfoques que se utilizaron para resolver TCTP fueron matemáticos y heurísticos con los cuales se obtenían óptimos y casi óptimos resultados con relación lineal al tiempo – costo, pero mostraban debilidad en la solución de problemas de compensación de tiempo discreto además de que ninguno de los enfoques matemáticos exactos puede resolver demandas grandes y difíciles, medidas por ejemplo en el número de actividades (Xu et al., 2012).

A partir de ahí se han propuesto diferentes metodologías o enfoques con el objetivo de lograr dicho equilibrio permitiendo que el costo total se minimice y cumpliendo un plazo determinado para el proyecto.

Estas metodologías o enfoques propuestos en la literatura pueden clasificarse en tres clases: algoritmos exactos como programación lineal, algoritmos heurísticos y algoritmos metaheurísticos (Afruzi, Roghanian, Najafi, & Mazinani, 2013; Ghoddousi et al., 2013; Xu et al., 2012; Yang, 2011).

(Afruzi et al., 2013) proponen un modelo de compensación de costo – tiempo discreto con recursos compartidos multimodo (MRC-DTCTP) resuelto a través de un algoritmo genético de dominancia difusa ajustado.

Además, (Peng & Yu, 2008) proponen un modelo con restricciones de recursos en modo múltiple (MRC – DTCTP) en el que agregan restricciones tanto para recursos renovables como para no renovables. Teniendo en cuenta las características del modelo que plantean lo resuelven a través de un algoritmo de marca y límite y desarrollan una curva completa de compensación tiempo – costo para una red de proyecto. El modelo que proponen aplicado a la red les permite mostrar la efectividad del mismo para equilibrar la relación entre la duración del proyecto y el costo.

(Zhang, Xu, & He, 2007) plantean una extensión del DTCTP en la que se tienen en cuenta restricciones de cambio de tiempo. Argumentando que en la literatura actual

sobre este problema (DTCTP) las restricciones de cambio de tiempo son ignoradas proponen entonces un modelo de optimización para el tiempo – costo en la programación de proyectos con restricciones de tiempo (DDCTPTSC) y lo resuelven a través de un algoritmo heurístico de personalización.

(Yang, 2011) aborda el problema estocástico de intercambio tiempo – costo (STCTP) en el que el tiempo de actividad y el costo deben estimarse como distribuciones probabilísticas para manifestar grandes variaciones y para administrar los riesgos inherentes.

El propósito del enfoque propuesto es hallar un conjunto de opciones de actividades cuyos objetivos se evalúan como medidas de valor en riesgo de la duración del proyecto y el costo total, para esto con la ayuda de la simulación Monte Carlo correlacionada (MCS) y un algoritmo de optimización multiobjetivo amplía el análisis de la relación tiempo – costo en presencia de incertidumbre.

Se destaca también, que la teoría fuzzy es una herramienta muy utilizada en el planteamiento de la mayoría de los enfoques enunciados anteriormente, ya que en algunas ocasiones las variables aleatorias no pueden describir las duraciones de una actividad debido a que las distribuciones de probabilidad para dicha actividad son desconocidas o solo parcialmente conocidas como consecuencia de la falta de datos estadísticos, por lo tanto, la teoría de conjuntos difusos suele ser más apropiada que la teoría de la probabilidad puesto que permite tratar con información ambigua (Xu et al., 2012).

### **3.2 Marco conceptual**

Algunos conceptos que se requieren para el desarrollo del trabajo de grado tomados de (Project Management Institute, 2013) son:

**Actividad:** Una porción definida y planificada de trabajo ejecutado durante el curso de un proyecto.



**Alcance:** La suma de los productos, servicios y resultados a ser proporcionados como un proyecto.

**Ciente:** El cliente es la(s) persona(s) u organización(es) que pagará(n) por el producto, servicio o resultado del proyecto.

**Crashing:** Una técnica utilizada para acortar la duración del cronograma con el menor incremento de costo mediante la suma de recursos.

**Fecha de inicio y fecha de finalización:** La fecha de inicio es un punto en el tiempo asociado al inicio de una actividad del cronograma mientras que la fecha de finalización representa la conclusión de una actividad en el cronograma

**Modelo de programación:** Una representación del plan para ejecutar las actividades del proyecto que incluye, duraciones, dependencias y demás información de planificación, utilizada para generar un cronograma del proyecto.

**Proyecto:** Un esfuerzo temporal que se lleva a cabo para crear un producto, servicio o resultado único.

Del mismo modo algunos conceptos mencionados frecuentemente en la literatura tomados de (Morillo & Moreno, 2014), se mencionan a continuación:

**Algoritmos exactos:** Tienen como característica el uso de técnicas analíticas o matemáticas que aseguran la convergencia a una solución óptima, si esta existe. Estos algoritmos se basan en teoremas matemáticos para desarrollar procedimientos que garantizan una solución óptima. No son siempre la solución adecuada ya que ninguno de ellos es realmente robusto, es decir, que se pueda aplicar a una variedad de problemas y que siga siendo eficiente en el procedimiento de encontrar la solución óptima.

**Métodos iterativos de aproximación:** Son aquellos que incorporan un proceso iterativo, en el que, en cada iteración, mediante algún razonamiento, se realiza una

búsqueda que permite la construcción o mejora de la situación actual. El razonamiento puede ser tan ingenioso que da origen a las heurísticas o metaheurísticas cuya implementación ha mostrado gran versatilidad y eficiencia. Estos métodos comparten la característica de que no pueden garantizar una solución óptima (aunque en algunas ocasiones se obtiene), a pesar de ellos la práctica ha mostrado que suelen llegar a ser soluciones muy buenas.

## **4 PROPUESTAS METAHEURÍSTICAS PARA LA ACELERACIÓN DE PROYECTOS**

Teniendo en cuenta que el primer objetivo del presente trabajo de grado es la caracterización de métodos metaheurísticos para acelerar actividades en un proyecto, se hace necesario acotar el número de propuestas mediante una revisión bibliográfica.

Dicha revisión se llevó a cabo en diferentes bases de datos entre las que se destaca Science Direct debido a la cantidad de información proporcionada para el trabajo de grado. La búsqueda realizada se centró principalmente en metodologías que permitieran resolver el TCTP y sus diferentes extensiones o análisis como, por ejemplo, el DTCTP.

Algunas consideraciones adicionales que se tuvieron en cuenta para la búsqueda fueron el sector del caso de estudio (obras civiles o proyectos de construcción) y palabras claves como: crashing, project scheduling, CPM – PERT, entre otras.

Se consultaron alrededor de 20 artículos en los que se identificaron tres metodologías usadas para la solución del problema (algoritmos exactos, heurísticas y metaheurísticas). De ahí se descartaron los artículos que se enfocaban en las dos primeras metodologías pues no se ajustaban con los criterios con los que se acoto o definió el primer objetivo del trabajo.

Como resultado de la depuración realizada se encontraron 3 artículos de optimización de colonia de hormigas, 6 de algoritmos genéticos, 1 de búsqueda tabú y 1 de optimización de enjambre de partículas. Estas metaheurísticas representan metodologías propuestas para el TCTP.

A continuación, se consideran de manera general cada una de las metaheurísticas encontradas y en el ANEXO 1 (archivo adjunto en Excel) se presenta un cuadro a

manera de resumen de las características que se tuvieron en cuenta en cada una de ellas.

#### **4.1 Optimización de colonia de hormigas**

(Kalhor et al., 2011) emplean un enfoque de colonia de hormigas archivadoras no dominado (NA – ACO por sus siglas en ingles), en las que se consideran la duración y el costo total del proyecto como dos objetivos en lugar de ponderarlos en una función objetivo única. De esta manera, en un ambiente multiobjetivo se encuentran soluciones que son mejores al resto cuando todos los objetivos se consideran simultáneamente, estas soluciones se llaman no dominadas y son las que se pretenden encontrar con respecto al costo y duración del proyecto bajo incertidumbre con la ayuda de la teoría de números difusos.

Tradicionalmente, el enfoque de ruta crítica supone que los costos y duraciones de las actividades son ciertos y la ejecución del proyecto se llevará a cabo bajo condiciones normales, sin embargo, en la vida real existen condiciones (climáticas, de equipos, de productividad, etc.) que pueden conllevar a diferir el tiempo y la duración real con la estimada. Como se cita en (Kalhor et al., 2011), “En los proyectos de construcción las contingencias que afectan el tiempo y el costo de las actividades son en su mayoría de carácter no estadístico.”

Por consiguiente, en el modelo propuesto implementan la teoría de conjuntos difusos para responder a la incertidumbre en tiempos y costos del proyecto e incorporan un enfoque denominado de corte  $\alpha$ , para tener en cuenta el riesgo aceptado por el gerente del proyecto.

Como generalidades del modelo, se utilizan dos colonias de hormigas para optimizar simultáneamente los dos objetivos, los tamaños de la población de hormigas son los mismos y la secuencia de colonias se define al azar. Como herramienta para definir valores de parámetros óptimos se adopta un enfoque de prueba y error.

Para mostrar la aplicación del modelo se toma un problema de 18 actividades adaptado de Feng et al., en el cual para cada actividad hay entre dos y cinco alternativas para elegir, además se resolvió utilizando MATLAB. El modelo propuesto produjo resultados después de 100.000 evaluaciones de funciones y se llevaron a cabo en un PC Dual Core de 2,5 GHz en 29,42 segundos; debido a esto se halla una ventaja, pues al ser el tiempo de ejecución tan corto, este se puede aplicar para resolver problemas más grandes dentro de tiempos aceptables.

(Mokhtari et al., 2011) desarrolla un modelo de TCTP estocástico con el que se busca mejorar de forma óptima la probabilidad de finalización del proyecto en un plazo definido. Asimismo, se formula como un problema de programación matemática no lineal donde la media y la varianza de las duraciones de las actividades son variables de decisión y la función objetivo trata de maximizar la probabilidad de finalización del proyecto. Este modelo se resuelve por medio del sistema de colonia de hormigas (ACS).

La ventaja de resolver el problema de TCTP de forma estocástica es que se pueden considerar situaciones de incertidumbre (por ejemplo, condiciones climáticas, adquisiciones indeseables y variaciones en el alcance del proyecto). En dicho modelo las actividades están sujetas a una función de costos discretos y se supone que tienen una distribución de probabilidad normal. Por otro lado, uno de los problemas que presenta el algoritmo según los autores son las soluciones no viables que crean las hormigas. Esto hace que algunos caminos deban eliminarse, ya que no cumplen con las restricciones.

Teniendo en cuenta de que el TCTP se puede ver desde el punto de vista de un presupuesto limitado o una fecha de entrega que se debe cumplir es importante resaltar que este artículo se enfoca en un presupuesto disponible limitado.

Debido a que el tiempo computacional y la medida de eficiencia de los resultados son dos variables que no se pueden optimizar simultáneamente, se definieron dos

parámetros adicionales los cuales representan la importancia de la métrica y la preferencia de quien toma las decisiones, y con esto se calcula una medida general.

Para evaluar el rendimiento del modelo se utilizaron problemas generados aleatoriamente con 10 y 80 actividades, se genera un número aleatorio uniforme para definir el número de restricciones de precedencia y para resolver el algoritmo se utilizó MATLAB 7.6.0., dentro del artículo no se menciona el tiempo computacional

Se desarrollan experimentos computacionales en los que se utilizan los parámetros iniciales de  $\alpha$  y  $\rho$  seleccionados aleatoriamente, se compararon los resultados obtenidos con el modelo realizado en MATLAB y LINGO para los proyectos de ejemplo que se realizaron y se obtuvo que el enfoque propuesto obtuvo un desempeño superior promedio de 0.716% en problemas pequeños y 0.183% en problemas grandes.

(Aghaie & Mokhtari, 2009) proponen un planteamiento basado en la optimización de colonia de hormigas ACO (Ant Colony Optimization) y la simulación Monte Carlo para tratar el problema de compensación tiempo - costo en condiciones de incertidumbre, ya que en el mundo real las duraciones de actividades se ven afectadas por condiciones climáticas, variaciones en el alcance del proyecto, etc. El modelo que se presenta determina el costo adicional que se debe asignar a las actividades, con el objetivo de mejorar la probabilidad de terminación del proyecto en una fecha predeterminada. El modelo considerado tiene un objetivo lineal sujeto a dos restricciones una lineal y otra no lineal.

Una ventaja de la metaheurística usada en la solución del modelo es que la mayor parte de los algoritmos metaheurísticos propuestos son efectivos en pequeñas instancias, mientras que el enfoque propuesto de ACO es aplicable para redes de gran escala. Además, los algoritmos de hormiga construyen repetitivamente soluciones nuevas a lo largo de la búsqueda.

El modelo propuesto se basa en dos estrategias FCS y NCS; en la primera los costos adicionales se asignan a la actividad y estas se planifican en las duraciones más cortas posibles, en la segunda no se necesitan costos adicionales y las actividades se planean en las duraciones más largas posibles. Así, el modelo intenta mejorar la probabilidad de terminación del proyecto seleccionando la combinación óptima de ambas estrategias para cada actividad.

Este método se llevó a cabo en dos pasos; clásicamente las redes probabilísticas se minimizan a una estructura determinista a través de la duración media de las actividades en lugar de las distribuciones reales, lo que conduce a una única ruta crítica, pero en condiciones estocásticas como las del modelo propuesto todas las rutas poseen una capacidad de criticidad, por lo tanto, en el primer paso se utilizó la simulación Montecarlo para seleccionar la ruta más crítica con el máximo valor de índice de criticidad.

En el segundo se usa el método de colonia de hormigas para mejorar la probabilidad de finalización del proyecto de una sola ruta. En este sentido, el enfoque propuesto ha sido designado para mejorar la probabilidad de terminación de la ruta más crítica, repitiendo hasta que haya satisfecho el nivel de confianza deseado por todas las rutas.

Para mostrar el rendimiento del modelo propuesto se aplicó en un ejemplo ilustrativo que se compone de 40 actividades, 25 nodos y 64 rutas interrelacionadas y se resolvió por medio de MATLAB 7.6.0., en la definición de parámetros se consideran valores de  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\rho$  arbitrarios para la primera corrida. Se realizan 10.000 ejecuciones de la simulación y no se menciona el tiempo computacional debido a las diferentes corridas que se hacen, sin embargo, estas corridas se presentan en segundos y no superan los 30s. Dado los resultados obtenidos con los valores de los parámetros de ACO, los autores manifiestan que es necesaria una adecuada determinación para evitar un óptimo local, debido a esto se resalta que un análisis apropiado de estos parámetros es un aspecto importante de la metaheurística ACO.

De la misma manera, para juzgar la efectividad del enfoque propuesto se realiza una comparación con la solución óptima obtenida por el software LINGO, considerando 12 ejemplos de redes aleatorias, en las que el enfoque de ACO actúa mejor que la solución de LINGO con un promedio de 3,07%.

## **4.2 Algoritmos genéticos**

(Ghoddousi et al., 2013) desarrollaron un modelo para la optimización de recursos de tiempo discreto – costo de recursos multimodo (MRC-DTCRO) para seleccionar el inicio del tiempo y el modo de ejecución de cada actividad y que cumplan con las limitaciones del proyecto.

Este enfoque tiene en cuenta el problema de programación de proyectos multimodo con restricciones de recursos (MRCPSP) el problema discreto de compensación tiempo – costo y la asignación de recursos y el problema de nivelación (RLP) simultáneamente y presenta entonces tres objetivos: minimizar el costo total, la duración total y la desviación del momento de los recursos en el proyecto. Dicho modelo se resuelve por medio de un algoritmo genético no dominado (NSGA-II).

Una suposición importante que se realiza en este modelo es que no hay preferencias entre el costo del proyecto, la duración o la desviación del momento de los recursos. Lo que podría entenderse es que si quien toma las decisiones en el proyecto otorga una preferencia a cualquiera de estos objetivos puede tomar fácilmente una decisión según las soluciones no dominadas. Además, se resalta que en este artículo no se considera ninguna restricción como fecha límite o presupuesto del proyecto.

Una desventaja del modelo que se propone es que tiende a ser menos eficiente para programar proyectos de construcción bajo incertidumbre, por lo que podría proponerse el uso de la teoría de números difusos para evaluar esos casos. Por otro lado, la principal innovación en este modelo es incorporar los efectos de la asignación y nivelación de recursos.



Para mostrar las capacidades del modelo se usan dos estudios de casos adaptados de Hartman y de Chen & Weng, el primer caso es un problema para la verificación del modelo y el segundo para demostrar la aplicación del mismo. El modelo se codificó en MATLAB R2011b en una computadora CPU Intel Core i7 de 6GB de RAM con sistema operativo Windows 7 Ultimate de 64 bits.

El primer caso consta de 6 actividades y dos modos para realizarlas, vale la pena mencionar que el espacio de solución de este caso incluye 212 soluciones y que a través de ensayo y error para obtener el mejor rendimiento se determinaron los parámetros del modelo GA (tamaño de la población, porcentaje de mutación y el número de generación).

El segundo caso es un proyecto de construcción real que posee 37 actividades y cada actividad posee modos diferentes para seleccionar. Aquí, para aumentar la velocidad de convergencia del modelo se realiza un análisis de sensibilidad para hallar los valores de los parámetros del modelo GA. Se resalta que después de la generación 150 las soluciones de frente de Pareto no cambiaron.

(Ke, Ma, & Chen, 2012) desarrollan tres modelos estocásticos (minimización de costos esperados, minimización de los costos y maximización de las utilidades) y lo combinan con un algoritmo genético que está diseñado para buscar horarios óptimos bajo diferentes criterios de toma de decisiones, en los cuales las duraciones de las actividades dependen del tiempo y que tienen como propósito minimizar el costo del proyecto limitado por el tiempo de finalización del mismo.

Los autores consideran que tanto la compensación entre el costo y el tiempo del proyecto como la incertidumbre del entorno, son factores que deben tenerse en cuenta para la toma de decisiones por los responsables del proyecto. Además, se considera que en la vida real los proyectos están sujetos a muchas variables externas como el cambio de clima, el aumento del nivel de productividad, etc. y por eso este enfoque se maneja desde la parte estocástica.

Se destaca que se desarrolla el problema de compensación tiempo costo con las duraciones de las actividades dependientes del tiempo, es decir que se tiene un tiempo en el que se espera terminar las actividades y con base en esto se aplican los recursos los cuales son los que se esperan minimizar.

Una de las limitaciones que presenta el enfoque propuesto es que se hace la suposición de que cada actividad puede procesarse sólo si todas las actividades anteriores han finalizado y debe procesarse sin interrupción. Sin embargo, este modelo contempla muchos aspectos importantes como lo son: el costo esperado del proyecto, el tiempo de finalización esperado del proyecto, la probabilidad de terminar el proyecto a tiempo entre otros.

Para mostrar la funcionalidad del modelo se tomó un proyecto ficticio como ejemplo el cual está construido por 14 actividades, una duración de 60 días y lo que se espera es disminuir el costo del proyecto. Para obtener soluciones casi óptimas se hizo correr el programa 3000 veces.

Una ventaja que también es notable de este enfoque es que durante las pruebas realizadas los errores no superaron el 0.75%.

(Eshtehardian, Afshar, & Abbasnia, 2009) presenta un enfoque para solucionar problemas de compensación tiempo - costo en un entorno incierto y se desarrolla por medio de un algoritmo genético multiobjetivo con un espacio de búsqueda bastante grande en el que se busca identificar el mejor conjunto de opciones de implementación definidas por los conjuntos de soluciones no dominadas. Para resolver el modelo se desarrolla un algoritmo inteligente que combina simulaciones estocásticas con algoritmos genéticos

Típicamente se supone que el costo y la duración de un proyecto son deterministas, pero en la realidad estas variables pueden verse afectadas por incertidumbres como errores de diseño, tensiones económicas, entregas tardías de materias primas, cambios climáticos, etc., por consiguiente, se utiliza un enfoque basado en los

números difusos para abordar la incertidumbre en los tiempos y costos de ejecución de las actividades. Del mismo modo, se aborda el nivel de riesgo aceptado por el tomador de decisiones a través del enfoque de corte  $\alpha$  y el índice de optimismo  $\beta$ .

Para mostrar el rendimiento del enfoque propuesto se presentan dos ejemplos de casos de estudios, el primero es una adaptación de Zheng et al, que consta de 7 actividades cada una con 3 a 5 modos para seleccionar. Aquí, se hallaron 12 soluciones no dominadas.

El segundo caso es una adaptación de Feng et al que consta de 18 actividades, consta de aproximadamente  $5.9 \times 10^9$  soluciones potenciales en todo el espacio de búsqueda, asimismo el algoritmo ha localizado una solución casi óptima con evaluaciones de funciones de  $1.5 \times 10^5$  buscando solo el 0.0025% del espacio de búsqueda total.

En el artículo no se mencionan tiempos computacionales ni las herramientas informáticas utilizadas para la ejecución del modelo. Tampoco se mencionan como fueron asignados los valores de los parámetros del GA.

Se encuentran también en la literatura algunas extensiones del DTCTP como, por ejemplo, (Xu et al., 2012) que presentan un modelo de toma de decisiones multiobjetivo, el cual tiene como funciones objetivo minimizar el tiempo y costo total del proyecto además del tiempo de aceleración y el impacto ambiental y se resuelve con la ayuda de un algoritmo genético híbrido adaptativo ((f)a- hGa) para hallar soluciones viables. Este enfoque se implementa en un proyecto hidroeléctrico que pretende demostrar la eficiencia del mismo. Este modelo se enfoca entonces en un problema discreto de compensación tiempo – costo – ambiente (DTCETP).

Bajo la premisa de que en un nuevo proyecto de construcción las actividades tienden a ser únicas y, por ende, carecen de datos históricos es difícil para los tomadores de decisiones caracterizar bajo funciones de probabilidad estas variables

aleatorias. Por esta razón, los autores consideran que el método fuzzy es un enfoque eficaz para estas situaciones.

Por otro lado, se debe resaltar que los autores buscan minimizar el impacto ambiental del proyecto evaluado desde el entorno ambiental y ecológico, lo que incluye aire, agua, suelo, ruidos, etc., y donde el objetivo principal es analizar la relación de causa y efecto entre el proyecto y su impacto ambiental. Dicho impacto ambiental se mide y se cuantifica a través de un enfoque ponderado.

Una ventaja del modelo propuesto es que posee dos modos para situaciones lineales y no lineales. Para el caso lineal el valor esperado difuso está integrado en el a-hGa mientras que, en el caso no lineal, la simulación difusa se combina con a-hGa para manejar la no linealidad de la borrosidad.

Para el modelo que se propone se adopta el procedimiento de suma de peso para tratar con el modelo de objetivos múltiples, estos pesos son dados por los tomadores de decisiones y reflejan la importancia de cada objetivo para cada uno de ellos.

Para mostrar una aplicación práctica del DTCETP se muestra un caso real de un proyecto hidroeléctrico a gran escala, el cual consta de 10 actividades desde el trabajo preliminar hasta el trabajo de limpieza y acabado y dos actividades ficticias. Se programa utilizando C++ y se ejecuta en un procesador Pentium 4, 2.40 GHz con 1024 MB de memoria.

De manera análoga se compara el modelo propuesto con algunos algoritmos heurísticos (((f) GA), (f) a-hGA, ((f) hGA) ), en condiciones similares, por lo cual se programan en C++ y se ejecutan con los mismos parámetros GA. Los resultados de estos experimentos computacionales demuestran que el (f) a-hGA requiere menos iteraciones que los otros para encontrar el óptimo, tiene una tendencia más estable y muestra un rendimiento de búsqueda mejor en entornos similares.

Por su parte en, (Monghasemi, Nikoo, Khaksar Fasaee, & Adamowski, 2015) aplicaron por primera vez un enfoque de razonamiento probatorio (ER) con el objetivo de identificar la mejor solución de Pareto para problemas de compensación tiempo – costo – calidad (DTCQTP). Lo que se propone es un modelo para el DTCQTP resuelto a través de un algoritmo genético multiobjetivo (MOGA) que incorpora el procedimiento NSGA-II (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm) obteniendo soluciones óptimas globales de Pareto y se aplica el enfoque de razonamiento probatorio para clasificar dichas soluciones.

Una ventaja del modelo propuesto es que permite a los tomadores de decisiones a través del enfoque ER conocer el rendimiento de cada solución con respecto a cada atributo y decidir sobre una solución óptima con más confianza, además de evaluar los puntos débiles de cada alternativa y si es conveniente aplicar estrategias de mejora.

Como generalidades del modelo se destacan que, el algoritmo genético es un método de búsqueda estocástico que se basa en el comportamiento biológico. Así, durante cada generación se seleccionan un par de soluciones parentales para criar y producir un par de niños, y con el propósito de la diversidad de la población se deben generar soluciones que son completamente diferente a las anteriores.

Además, se cuenta con un criterio de terminación para forzar al algoritmo a buscar continuamente mejores soluciones, este criterio representa el número máximo de generaciones. Un número elevado de generaciones requiere más esfuerzo computacional y un valor muy bajo evita que el modelo converja a una solución óptima. El parámetro de la población se establece según ejecuciones preliminares del modelo y garantiza la convergencia a soluciones óptimas.

Como el modelo se desarrolla con un enfoque multiobjetivo se utiliza la técnica de entropía de Shannon para determinar los pesos de cada objetivo, esta técnica permite obtener una evaluación más confiable de los pesos de cada objetivo en ausencia de las preferencias de los tomadores de decisiones.

Finalmente, con el propósito de mostrar la capacidad del enfoque propuesto se resuelve un estudio de caso en un proyecto de construcción de carreteras con 18 actividades propuesto por Feng, Liu y Burns y donde cada actividad se puede ejecutar en varios modos. Cada actividad posee 3,4 alternativas lo que conlleva a 3,6 mil millones de programas de actividades para todo el proyecto. Se codificó en MATLAB R2013a, los parámetros del algoritmo se establecen arbitrariamente y el tiempo medio de ejecución fue de 15,3 minutos. Se utilizó una computadora Intel Core i5 con CPU 2,6 GHz con 4GB de memoria.

(Ke & Ma, 2014) diseñan tres modelos para el problema de equilibrio entre tiempo – costo en el que se incluyen variables aleatorias difusas en un entorno incierto, el primer modelo busca la minimización de costos, el segundo la minimización de costos esperados y el tercero la maximización de oportunidades.

Proponen un método que integra la teoría de conjuntos difusos para describir el entorno en el que se desarrollan los proyectos debido a que estos se encuentran rodeados de muchos elementos no deterministas; en este sentido, el tiempo del proyecto puede extenderse o acortarse por factores externos como las condiciones climáticas, mano de obra adicional, un deceso en la productividad, entre otros.

Asimismo, para resolver los modelos propuestos se integra el diseño de tres tipos de simulaciones aleatorias difusas con algoritmos genéticos para crear un algoritmo inteligente híbrido mediante experimentos numéricos.

Se debe tener en cuenta que en este modelo se trabaja con actividades que deben ser procesadas sólo cuando todas las actividades anteriores hayan terminado de acuerdo con el tipo de precedencia y deben procesarse sin interrupción.

El objetivo de este modelo es maximizar la posibilidad de que el costo del proyecto no exceda el presupuesto y cumpliendo con la fecha de finalización del proyecto propuesta en la programación.

Debido a que este enfoque tiene en cuenta tres modelos, son muy amplios los campos que abarca y esto puede verse como una ventaja ya que facilita la toma de decisiones para el proyectista.

Para ilustrar este modelo se utilizó un proyecto con 14 actividades y para cada actividad se tienen los tiempos de duración, los costos normales, y los costos extra que se pueden aplicar al proyecto. Como resultado de la prueba se obtuvo que el algoritmo híbrido diseñado es estable porque los errores no son mayores al 1.66%.

### **4.3 Búsqueda tabú**

En la literatura hay varios estudios que han investigado los problemas de gestión de proyectos como el colapso del mismo y los problemas de equilibrio entre el tiempo y el costo, (Göçken, 2013) propone un enfoque multiobjetivo para resolver el problema de colapso de un proyecto con restricciones presupuestarias en el que incorpora la teoría de conjuntos difusos para modelar la incertidumbre en los parámetros de este como por ejemplo los factores ambientales inciertos. Dicho modelo se resolvió con la ayuda del algoritmo de búsqueda tabú.

El problema de bloqueo de proyecto se refiere a disminuir el tiempo de duración del proyecto al acelerar algunas de sus actividades aumentando el costo. Este modelo tiene como finalidad reducir la duración del proyecto y al mismo tiempo minimizar el costo de bloqueo.

En este modelo el costo de colapso incremental, el costo indirecto variable por unidad de tiempo, el tiempo de finalización del proyecto especificado y el presupuesto total se definen como números borrosos triangulares, porque son de naturaleza imprecisa.

Este enfoque tiene como ventaja la utilización de la búsqueda tabú debido a que se presenta la oportunidad de evaluar múltiples objetivos y además de esto se evita caer en la trampa de la optimización local ya que este algoritmo comienza con una

solución viable seleccionada y a partir de esta genera un conjunto de soluciones de vecindario.

Adicional a esto, el modelo trabaja con métodos de clasificación para números fuzzy lo que evita la defuzzificación que suele ser muy difícil y permite resultados mucho más precisos.

Para llevar a cabo este enfoque se debe trabajar bajo tres supuestos que son mencionados por los autores en el artículo, los cuales son:

1. Los parámetros imprecisos se definen como números borrosos triangulares.
2. Los costos directos aumentan linealmente a medida que la duración de una actividad se reduce de su tiempo normal a su valor de bloqueo.
3. Los costos indirectos se pueden dividir en dos categorías: costos fijos y costos variables, y el costo variable por unidad de tiempo es el mismo independientemente del tiempo de finalización del proyecto.

Del mismo modo se tiene un tamaño de lista Tabú = 15, tamaño de la vecindad = 20, número de iteraciones = 1000. Los autores aseguran que dentro de la literatura no existe una metodología analítica para determinar los parámetros del método de búsqueda tabú, por esto se resuelve el problema con diferentes parámetros y se elige el que presente el mejor resultado. Para mostrar el rendimiento del proyecto se utilizó un ejemplo numérico que consta de 11 actividades y se realizó en lenguaje C++.

#### **4.4 Optimización de enjambre de partículas**

(Aminbakhsh & Sonmez, 2016) plantean que a pesar de que existen diversos estudios que diseñan métodos heurísticos y metaheurísticos para el DTCTP, el éxito de estos en casos de gran escala ha sido muy escaso pues existe una brecha significativa entre la literatura y la gestión de los proyectos en la vida real. Con el objetivo de acortar esta brecha diseñan un método discreto de optimización de



enjambre de partículas (DPSO) que además de generar soluciones de calidad para el problema discreto de optimización tiempo – costo lo sean en tiempos de computación. En el método propuesto, integran una versión modificada del método de aproximación de Siemens con el diseño de un PSO que representa el espacio de solución discreta para el DTCTP, que permite acelerar la optimización.

Este modelo presenta ventajas importantes ya que además de que permite lograr soluciones de calidad en proyectos de gran escala con más de 600 actividades lo hace en un tiempo computacional muy bajo. Sin embargo, el enfoque que se maneja en el artículo es discreto lo cual limita mucho para proyectos de la vida real.

Para probar la funcionalidad del modelo se codificó en C++ y se compiló en Visual Studio 2013 a su vez se presentan 3 ejemplos los cuales tienen en cuenta instancias pequeñas con un proyecto de 18 actividades, donde el tiempo de procesamiento fue de 0.4 segundo y una desviación porcentual promedio (ADP) de 0.00%, para la instancia mediana se utilizó un ejemplo con 63 actividades y el tiempo de corrida fue de 1.3 segundos (ADP) 0.00% y por último se realizó la prueba en un proyecto de gran escala con 630 actividades que representa el tamaño de un proyecto de construcción de la vida real el cual tuvo una velocidad de corrida de 14.6 segundos y con un (ADP) de 0.05%. Para todos estos ejemplos se utilizaron diez corridas.

## **5 METODOLOGÍA PROPUESTA PARA LA ACELERACIÓN DE ACTIVIDADES EN UN PROYECTO DE OBRA CIVIL**

Teniendo en cuenta que el segundo objetivo del trabajo de grado es adaptar una metodología para la aceleración de actividades en un proyecto de obra civil se hace necesario elegir una metaheurística con base en la caracterización realizada en el capítulo anterior. La metodología por seguir es la propuesta por (Aghaie & Mokhtari, 2009) en la que se pretende mejorar la probabilidad de finalización del proyecto en una fecha determinada a través del algoritmo ACO.

Esta metodología fue seleccionada considerando la posibilidad de trabajar con actividades cuyas duraciones están expuestas a variables externas como, por ejemplo, el clima y, por lo tanto, pudieran modelarse de manera estocástica o fuzzy. Asimismo, se tuvo en cuenta el software en el que se programó cada modelo dado que era relevante la consecución del mismo para validar en el caso de estudio.

Sumado a esto, esta metodología da solución al TCTP a través de una metaheurística interesante, fácil de entender y que se apoya en una herramienta ya conocida como la simulación Monte Carlo, lo cual facilitó el entendimiento del modelo.

El algoritmo ACO es una metaheurística propuesta por Dorigo Marco para resolver problemas de optimización combinatoria y su primera aplicación fue en la resolución del problema del agente viajero (Aghaie & Mokhtari, 2009). Este algoritmo está inspirado en la naturaleza, ya que las verdaderas colonias de hormigas cuando encuentran una fuente de alimento evalúan la calidad de la ruta descubierta usando una sustancia química llamada feromona que dirige a las demás hormigas hacia el alimento. Así, la cantidad de feromonas liberadas será una guía para las siguientes hormigas convirtiéndose en un factor importante para la comunicación y les permite encontrar el camino más corto entre el nido y la comida en poco tiempo (Aghaie & Mokhtari, 2009)

Un aspecto importante de este algoritmo resalta el hecho de que las buenas soluciones encontradas son el resultado de la comunicación y cooperación de las hormigas a través de su rastro de feromonas (Kalhor et al., 2011). Este rastro será una guía directa para que las hormigas siguientes mejoren una solución inicial.

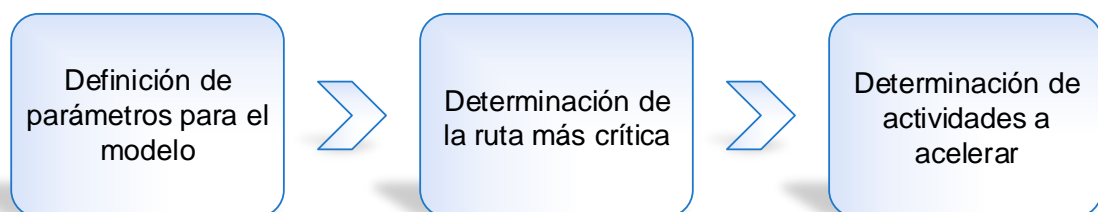
En la metodología propuesta cada hormiga se mueve desde la actividad inicial en la ruta más crítica de la red, eligiendo entre dos estrategias (acelerar o no la actividad) con el propósito de completar una solución. Dicha solución es equivalente a la combinación de las dos estrategias y conduce a la minimización del costo directo del proyecto restringido por una fecha y una probabilidad de terminación del mismo que ya se encuentra definida.

En este sentido, la metodología propuesta puede describirse en tres fases como se muestra en la figura 1. En la primera fase se presenta la notación y los parámetros requeridos para el modelo y con esta se busca establecer las conexiones entre la información del proyecto o caso de estudio y las variables del modelo.

En la segunda fase se busca determinar la ruta crítica de la red, por ello con las rutas de probabilidad menor a la definida, se realiza simulación Monte Carlo con el propósito de elegir la ruta más crítica entre ellas.

Por último, en la tercera fase se ejecuta el algoritmo ACO con el objetivo de encontrar la combinación de estrategias con las cuales se cumpla la fecha de terminación y la probabilidad deseada.

*Figura 1. Fases metodología propuesta*



*Fuente: Elaboración propia adaptada de (Aghaie & Mokhtari, 2009)*

## 5.1 Fase 1. Definición de parámetros para el modelo

Esta fase hace referencia a la información primaria necesaria para el desarrollo de la metodología a utilizar adaptada de (Aghaie & Mokhtari, 2009).

### 5.1.1 Notación utilizada

La notación utilizada en el presente trabajo de grado necesaria para el desarrollo y comprensión de la metodología aplicada se muestra a continuación:

$n$  = Número total de actividades

$L$  = Número total de rutas

$(i, j)$  Actividad con nodo inicial  $i$  y nodo final  $j$

$\lambda_{ij}$  = Duración media de la actividad  $ij$

$\lambda_{ij}^l$  = Limite inferior de la duración de la actividad  $iesima$

$\lambda_{ij}^u$  = Limite superior de la duración de la actividad  $iesima$

$S_{ij}$  = Pendiente del costo de la actividad  $(i, j)$

$C_{ij}$  = Costo fijo de la actividad  $(i, j)$

$T_d$  = Duración definida para la terminación del proyecto

$m$  = Número de hormigas

$\alpha$  = Factor del efecto de las feromonas

$\beta$  = Factor atractivo

$\rho$  = Tasa de evaporación de feromonas

$CL = \text{Probabilidad deseada de finalización del proyecto}$

$$\xi_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si la estrategia seleccionada es FCS} \\ 0 & \text{si la estrategia seleccionada es NCS} \end{cases}$$

$$\lambda_{ij} = \begin{cases} \lambda_{ij}^l & \text{si la estrategia seleccionada es FCS} \\ \lambda_{ij}^u & \text{si la estrategia seleccionada es NCS} \end{cases}$$

### **5.1.2 Distribución para la duración de las actividades**

Para asignar una distribución estadística a la duración de las actividades se puede buscar información histórica de las actividades realizadas en el proyecto o actividades similares o tomar como referencia proyectos de otras empresas o información en la literatura.

Debido a que no se encontró la información requerida para calcular la distribución de las actividades, se consultó la opinión de expertos con el fin de obtener tres valores posibles los cuales son optimista, pesimista y más probable. Por medio de esta alternativa se busca utilizar la distribución normal que usa como parámetros la media y la desviación estándar de los datos.

### **5.1.3 Ajuste de parámetros**

Un aspecto importante para el rendimiento del algoritmo colonia de hormigas es el valor asignado a cada parámetro, ya que pueden conducir el algoritmo hacia óptimos locales, o, directamente hacia la solución y disminuir el tiempo de convergencia (Mokhtari et al., 2011). Para esto, inicialmente se ejecuta el algoritmo con los valores de los parámetros propuestos por Komarudin, citados en (Kalhor et al., 2011). Luego, se realiza un enfoque de prueba y error para diferentes valores en los parámetros de ACO ( $\rho, \alpha, \beta$ ) para así determinar qué conjunto de valores son los apropiados para el modelo.

## 5.2 Fase 2. Determinación de la ruta más crítica

Para la determinación de la ruta más crítica se aplica el modelo de simulación Monte Carlo propuesto por (Aghaie & Mokhtari, 2009), el cual tiene en cuenta el índice de criticidad de la ruta PCI (Path Critical Index). Este término se introduce en el modelo ya que se requiere determinar que tan críticas son las actividades en la red y que probabilidad existe de que pertenezcan a la ruta crítica del proyecto. Para determinar el valor de PCI se tiene la siguiente formula:

$$PCI_g = \frac{\psi_g}{N} \quad (1)$$

Donde:

$\psi_g$  = Variable aleatoria que corresponde a la ruta  $g$

$N$  = Número de corridas

Es importante resaltar que  $\psi_g$  sigue una distribución binomial con parámetros  $(N, P_g)$  con el fin de determinar si dicha actividad pertenece o no a la ruta crítica. Entonces se puede concluir que las actividades que presenten mayor porcentaje de criticidad van a conformar así la ruta más crítica.

Con base en cada uno de los PCI obtenidos anteriormente se puede concluir que la ruta más crítica es aquella que cumpla lo siguiente:

$$RMC = \{r | PCI_r = \text{Max } PCI_g \quad g = 1, 2, 3 \dots L\} \quad (2)$$

### 5.3 Fase 3. Determinación de las actividades a acelerar

Esta fase se relaciona directamente con la metodología propuesta por (Aghaie & Mokhtari, 2009), en la cual se determinan las actividades que requieren acelerarse para mejorar la probabilidad de que el proyecto termine en una fecha específica.

#### 5.3.1 Estrategias para cada actividad

(Aghaie & Mokhtari, 2009) proponen dos estrategias para cada actividad:

*FCS*: en la cual todos los costos adicionales se asignan a la actividad y se planifica en la duración más corta posible.

*NCS*: en la cual no se necesitan costos adicionales para la actividad y se planifica en la duración más larga posible.

Para la elección de las estrategias los autores proponen una política estocástica: cada hormiga elige temporalmente *FCS* o *NCS* y se suman las probabilidades de elegirlos, luego se genera un número aleatorio uniforme. Si el número aleatorio es menor que la probabilidad acumulada se selecciona permanentemente la opción elegida de lo contrario se toma la segunda opción.

#### 5.3.2 Formulación matemática

Generalmente, el tiempo total del proyecto es la duración de la ruta más larga del mismo y el costo total es la suma de los costos directos e indirectos que se presenten. Así, tomando de (Kalhor et al., 2011) el costo y la duración total de un proyecto pueden expresarse como se muestra a continuación:

$$C = \sum_i \sum_j C_{ij} + C \times T \quad (3)$$

Donde:

$C \times T$  representa el costo indirecto asociado a la duración del proyecto.

$$T_p = \sum_{ij \in P} t_{ij} \quad (4)$$

Donde:

$T_p$  representa la duración de la ruta  $p$ , siendo  $p$  la ruta más crítica.

$t_{ij}$  representa la duración de ir de la actividad  $i$  hasta la actividad  $j$ .

Como se ha mencionado anteriormente, el objetivo de la aceleración de actividades es hallar soluciones optimas que permitan un equilibrio entre el costo y la duración de un proyecto. Por consiguiente, con la intención de cumplir dicho objetivo (Aghaie & Mokhtari, 2009) proponen un modelo matemático que busca mejorar la probabilidad de finalizar un proyecto a través de la selección de la combinación de tiempo-costo expresadas en las dos estrategias mencionadas anteriormente (FCS y NCS) para cada actividad que hace parte de la ruta crítica.

Para el modelo propuesto, se tienen en cuenta de la fórmula 3 los costos directos ( $C_{ij}$ ) de cada actividad y su respectivo aumento en caso de ser acelerada. Además de la fórmula 4 debido a la distribución de probabilidad asignada a las actividades del proyecto, el termino  $t_{ij}$  es reemplazado por  $\lambda_{ij}$  que representa las duración media de las actividades.

La expresión matemática que describe el modelo se presenta a continuación:

$$\text{Min } Z = \sum_{ij \in r} [\xi_{ij} \times S_{ij} \times (\lambda_{ij}^u - \lambda_{ij}^l) + C_{ij}] \quad (5)$$



Sujeto a:

$$\frac{T_d - \sum_{ij \in r} [\xi_{ij} \times \lambda_{ij}^l + (1 - \xi_{ij}) \times \lambda_{ij}^u]}{\sqrt{\sum_{ij \in r} [\xi_{ij} \times \lambda_{ij}^l + (1 - \xi_{ij}) \times \lambda_{ij}^u]^2}} \geq Z_{1-CL} \quad (6)$$

$$\xi_{ij} = 0 \text{ o } 1 \quad (7)$$

El modelo tiene como función objetivo la minimización del costo directo total asociado a las actividades  $(i, j)$  que pertenecen a la ruta crítica de la red. Aquí se plantea que si la estrategia de aceleración seleccionada es NCS ( $\xi_{ij} = 0$ ) en esa actividad sólo se tendrá en cuenta el costo directo de realizarla. Por otro lado, si la estrategia seleccionada es FCS ( $\xi_{ij} = 1$ ) además del costo fijo de realizarla, se tendrá en cuenta también el costo adicional de acelerar la actividad para reducir su duración media. Este costo adicional se considera como la multiplicación de la razón de cambio entre el costo normal y el acelerado por unidad de tiempo y el rango de duración de la actividad.

Por otra parte, la restricción busca asegurar la finalización del proyecto en una fecha establecida con una probabilidad determinada ( $CL$ ). La expresión está adaptada a partir del teorema del límite central por (Aghaie & Mokhtari, 2009) y suponen que se tiene un número suficientemente grande de actividades en la ruta por lo que la probabilidad de finalización de cierta ruta en una fecha establecida ( $T_d$ ) dependen de la media y la desviación de la duración de las actividades  $(i, j)$ .

De manera que, en el numerador se tiene la diferencia entre la fecha establecida para el fin del proyecto y la sumatoria de las duraciones medias para las actividades  $(i, j)$  que hacen parte de la ruta crítica; mientras que en el denominador se tiene la raíz cuadrada de la sumatoria de las duraciones medias elevadas al cuadrado que representan la desviación estándar de la ruta.

De manera análoga a la función objetivo, en la restricción se tiene en cuenta si estas actividades  $(i, j)$  son aceleradas o no a través de la variable  $\xi_{ij}$ . Si la estrategia seleccionada es NCS la duración media para esa actividad va a tomar el valor de su límite superior, de lo contrario si la estrategia seleccionada es FCS la duración media para esa actividad adoptara el valor de su límite inferior.

### 5.3.3 Optimización de colonia de hormigas

El algoritmo de colonia de hormigas (ACO) va a ser utilizado en el presente trabajo de grado para determinar cuáles de las actividades se deben acelerar, a través de las estrategias antes mencionadas con el fin de cumplir una probabilidad definida de finalización del proyecto denominada  $CL$  y al menor costo posible.

Cada hormiga se va a mover desde la primera actividad de la ruta crítica hasta la final eligiendo entre una estrategia FCS y una estrategia NCS, por lo que se puede afirmar que para la actividad  $(i, j)$  la hormiga tendrá dos posibilidades o caminos. En consecuencia, la probabilidad de escoger una estrategia según el algoritmo de colonia de hormigas para cada una de las actividades es la siguiente:

Para FCS

$$P_{(i,j)F}^K = \begin{cases} \frac{(\tau_{ij}^F)^\alpha (\eta_{ij}^F)^\beta}{[(\tau_{ij}^F)^\alpha (\eta_{ij}^F)^\beta + (\tau_{ij}^N)^\alpha (\eta_{ij}^N)^\beta]} & \text{Si } ij \in N \\ 0 & \text{Si } ij \notin N \end{cases} \quad (8)$$

Para NCS

$$P_{(i,j)N}^K = \begin{cases} \frac{(\tau_{ij}^N)^\alpha (\eta_{ij}^N)^\beta}{[(\tau_{ij}^F)^\alpha (\eta_{ij}^F)^\beta + (\tau_{ij}^N)^\alpha (\eta_{ij}^N)^\beta]} & \text{Si } ij \in N \\ 0 & \text{Si } ij \notin N \end{cases} \quad (9)$$

$P_{(i,j)}^K$  representa la probabilidad de que la  $k$ -ésima hormiga elija ya sea la estrategia FCS o NCS; esta probabilidad se ve afectada por dos elementos a considerar  $\tau_{ij}$  y  $\eta_{ij}$  que representan el sendero de feromonas de la hormiga y el atractivo de cada opción característicos para cada estrategia. Asimismo, por dos parámetros importantes para el algoritmo  $\alpha$  y  $\beta$  que representan un factor para el efecto de las feromonas y el atractivo de cada opción respectivamente.

En este sentido, como puede verse en las formulas anteriores se tiene un elemento de visibilidad o de atractivo  $\eta_{ij}$  que afecta la probabilidad y que depende de la conexión que tenga la actividad  $(i,j)$ . Para este modelo, esa conexión se representa por el costo de cada estrategia, en el que intervienen el costo fijo de la actividad y la pendiente del costo de aceleración.

$$\eta_{ij}^N = \frac{1}{\text{Costo de NCS para } (i,j)} = \frac{1}{C_{ij}} \quad (10)$$

$$\eta_{ij}^F = \frac{1}{\text{Costo de FCS para } (i,j)} = \frac{1}{S_{ij} \times (\lambda_{ij}^u - \lambda_{ij}^l) + C_{ij}} \quad (11)$$

Asimismo, interviene un elemento que representa el rastro de feromonas  $\tau_{ij}$  en cada opción y que depende de que tan buena es esa solución para el modelo, es decir, que las soluciones que impliquen un menor costo emiten una mayor cantidad de rastro de feromonas. Este modelo como ya se mencionó anteriormente está basado en la naturaleza y funciona a partir de la feromona que depositan las hormigas.

Debido a esto, se hace necesario plantear una ecuación que permita a las hormigas actualizar el rastro de feromona, es decir, una solución que sea recorrida por muchas hormigas debe tener una cantidad superior de feromonas, si esta se compara con una solución que sea utilizada por pocas o por ninguna hormiga, así

entonces se tiene que la actualización de feromonas se realiza de la siguiente manera:

$$\tau_{ij}^F = (1 - \rho)\tau_{ij}^F + \sum_F \Delta\tau_{ij}^F \quad (12)$$

$$\tau_{ij}^N = (1 - \rho)\tau_{ij}^N + \sum_N \Delta\tau_{ij}^N \quad (13)$$

Donde:

$$\Delta\tau_{ij}^K = \frac{Q^k}{\sum_{ij \in RMC} [\xi_{ij} \times S_{ij} \times (\lambda_{ij}^u - \lambda_{ij}^l)] + \varepsilon} \quad (14)$$

Cuando las hormigas han completado una solución se actualiza el rastro de feromonas,  $\tau_{ij}$  es la cantidad de feromonas que depositan las hormigas en las estrategias seleccionadas  $(1 - \rho)$  indica la tasa de evaporación de estas y  $\Delta\tau_{ij}^K$  representa el valor de la feromona producido. Este procedimiento ayuda a las hormigas siguientes a encontrar una mejor solución directamente.

Debido a que el valor de la feromona producido depende de la calidad de las soluciones encontradas por las hormigas,  $\Delta\tau_{ij}^K$  se define en términos de la viabilidad y bondad de la solución. En términos de viabilidad, solo las hormigas que cumplan el nivel de probabilidad de finalización del proyecto propuesto ( $CL$ ) serán tenidas en cuenta; se tiene que  $Q^k$  se comporta como una variable binaria que toma el valor uno si la solución cumple dicha probabilidad y el valor de cero en caso contrario. Esto evita que las hormigas que recorran una solución sin cumplir la probabilidad propuesta generen rastros de feromona. Por otro lado, en términos de bondad de la

solución se busca la minimización de costo y  $\varepsilon$  es un número muy pequeño que evita la división por cero.

## 6 CONTEXTUALIZACIÓN

Dado que el tercer objetivo del trabajo de grado es validar la metodología propuesta por medio de un caso de estudio, se hace necesario mostrar las características de dicho caso. En consecuencia, el propósito de este capítulo es presentar el proyecto en el cual se aplicó la metodología seleccionada, así como también presentar los perfiles de los expertos que fueron consultados.

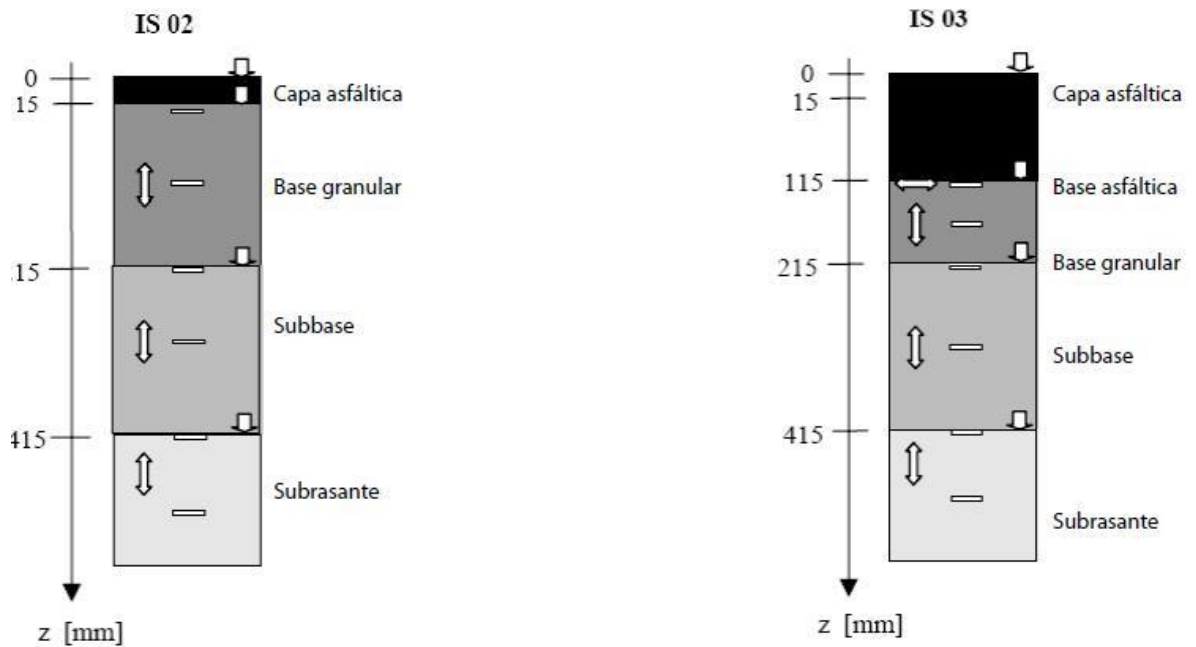
### 6.1 Caso de estudio: Construcción de una carretera en Palmira, Valle

La empresa que suministró la información del proyecto fue fundada en el año 2011 y se encuentra ubicada en la ciudad de Palmira. Entre sus actividades se aprecian: el alquiler de maquinarias pesadas, la construcción de vías de grandes magnitudes, urbanismo, transporte de materiales, demoliciones, entre otros.

El proyecto objeto de estudio es la construcción de una vía de 285 metros por 7,20 metros ubicada en el barrio Santa Bárbara de Palmira. Este proyecto consta de la construcción de la carretera, la instalación de la red sanitaria y la construcción de un andén. Para la construcción de la carretera, no se tiene contratada la capa asfáltica. Para dicho proyecto se estimó un plazo de terminación de cuatro meses y actualmente la obra se encuentra en ejecución.

Es importante resaltar que para la construcción de la carretera se tiene en cuenta la estructura de la misma mostrada en la figura 2. De manera que, las primeras actividades realizadas en la obra van en pro de conformar esta estructura (sub-rasante, sub-base y base). Sin embargo, para la instalación de la red sanitaria se hace necesario llevar el proceso hasta la sub-base y luego volver a excavar para así evitar que la tubería exceda la altura requerida para la vía.

Figura 2. Estructura de la vía.



Fuente: (Quintana et al., 2018)

Como se muestra en la figura 2, las especificaciones de cada una de las capas que conforman la estructura de las vías pueden cambiar teniendo en cuenta las especificaciones del cliente o las medidas manejadas por la constructora, Sin embargo, la imagen a manera de ejemplo presenta las diferentes capas que se construirán de la vía con excepción de la carpeta asfáltica.

El proyecto consta de 20 actividades divididas en tres secciones como se muestra en la tabla 1, donde se presentan además las duraciones y los costos planeados para el proyecto.

Tabla 1. Costos y duraciones planeadas de las actividades.

Actividades	Duración planeada (días)	Costo planeado
<b>Construcción vía</b>		
Localización nivelación y replanteo de vía	2	\$1.857.846

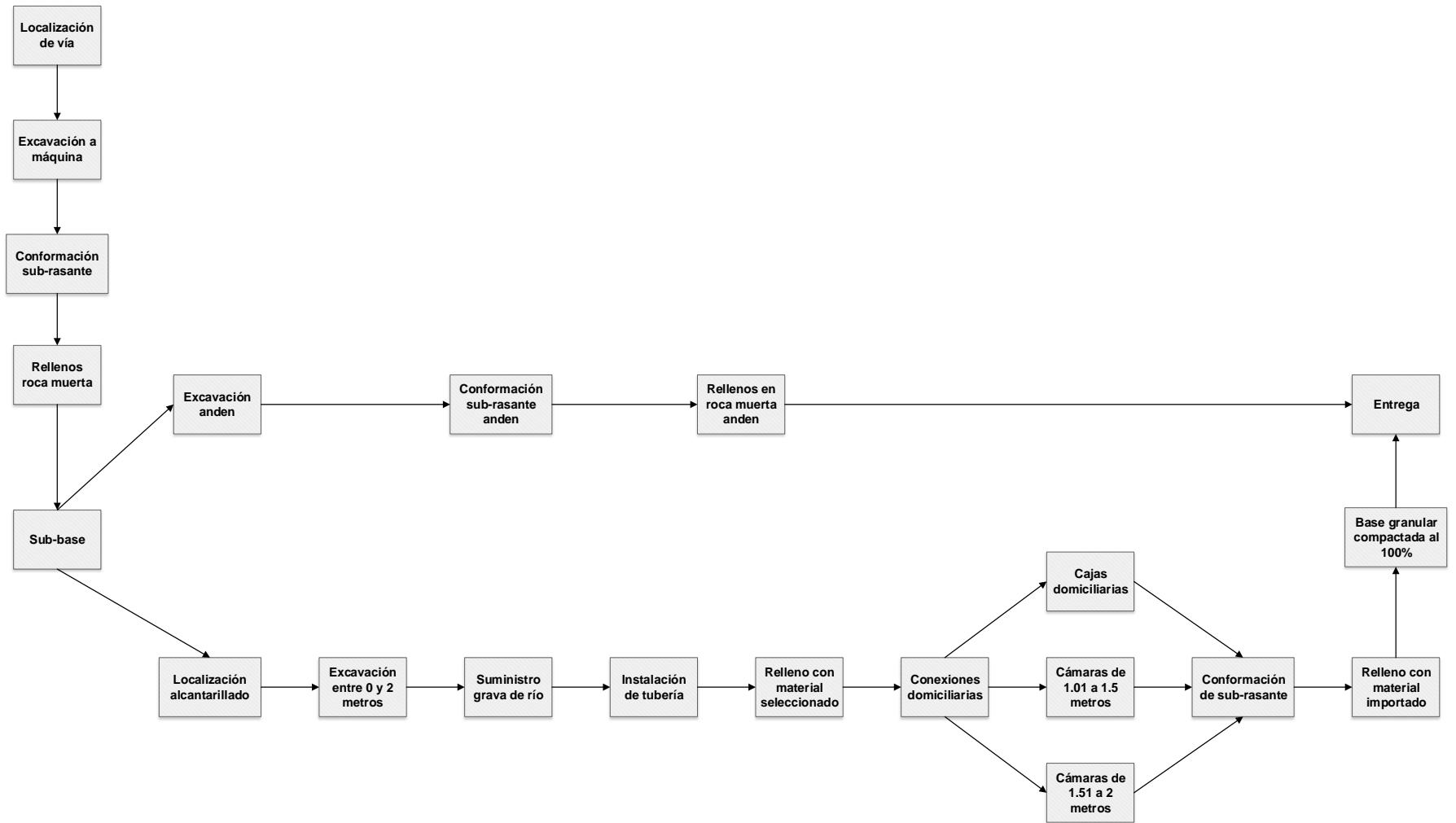
Excavaciones a máquina en cualquier tipo de material	10	\$18.103.734
Conformación y compactación de la sub-rasante	1	\$974.370
Rellenos en roca muerta para mejoramiento y nivelación de la sub-rasante compactados al 95%	2	\$58.019.346
Sub-base granular compactado al 95%, debe cumplir norma Invias 320	4	\$63.389.725
Base granular compactada al 100% del PM para vías, debe cumplir norma Invias 330	3	\$49.426.253
<b>Red sanitaria</b>		
Localización y replanteo de redes de alcantarillado	1	\$928.923
Excavación en tierra en seco a máquina entre 0 y 2 metros de profundidad	8	\$6.856.494
Suministro y colocación de triturado o grava de río para cimentación de tuberías	3	\$5.147.920
Instalación de tubería de alcantarillado PVC corrugada ø8" (200mm)	3	\$14.862.760
Conexiones domiciliarias de alcantarillado.	13	\$2.204.000
Cajas domiciliarias de inspección en concreto.	7	\$1.576.000
Cámara de inspección alcantarillado altura cilindro de 1,01 a 1,5 metros, incluye losa y tapa.	7	\$3.180.000
Cámara de inspección alcantarillado altura cilindro de 1,51 a 2 metros incluye losa y tapa prefabricada.	12	\$1.092.000
Relleno con material seleccionado de la excavación compactado al 90%	12	\$741.787
Conformación y compactación de sub-rasante	2	\$608.022
Relleno con material importado compactado al 95%	3	\$3.465.725
<b>Construcción anden</b>		
Excavaciones de anden eje 3	8	\$2.077.120
Conformación y compactación de la sub-rasante anden eje 3	7	\$208.017
Rellenos en roca muerta para mejoramiento y nivelación de la sub-rasante compactados al 95% anden eje 3	11	\$26.256.649

Fuente: Elaboración propia con base en la información dada del proyecto



Debido a que no se contaba con un diagrama de red para el proyecto, se construyó con la ayuda del ingeniero a cargo de la obra con el propósito de ver las rutas presentes para la realización del proyecto. En la figura 3 se planteó la ruta desarrollada y en esta se pueden identificar cuatro rutas.

Figura 3. Diagrama de red construcción de vía.



Fuente: Elaboración propia con base en la información dada del proyecto

## 6.2 Perfil de expertos

En la tabla 2 se muestra la profesión y la experiencia de los expertos que apoyaron la realización de este trabajo de grado. Su ayuda se vio representada en estimaciones para las duraciones de las actividades, así como para la construcción de la red del proyecto.

*Tabla 2. Perfil de expertos consultados.*

	<b>Experto 1</b>	<b>Experto 2</b>
<b>Profesión</b>	Topógrafo	Ingeniero Civil
<b>Experiencia</b>	23 años	10 años

*Fuente: Elaboración propia.*

## **7 APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA EN EL CASO DE ESTUDIO**

En este capítulo se presentan las tres fases propuestas. La primera fase tiene como resultado el acople entre cada uno de los parámetros del modelo y la información obtenida del proyecto, en la segunda fase se obtienen las rutas del proyecto que deben acelerarse y en la tercera se presentan la combinación de estrategias propuestas para cada ruta como resultado del algoritmo.

Para el modelo aplicado en la construcción de la carretera se consideraron los siguientes supuestos:

- Las duraciones de cada actividad normales y aceleradas siguen una distribución normal.
- Se conocen los costos normales y acelerados de cada una de las actividades del proyecto.
- Cuando se comienza una actividad, no se puede interrumpir.
- Se consideraron como días laborables de lunes a viernes.
- No se tomaron en consideración riesgos.

### **7.1 Fase 1. Definición de parámetros para el modelo**

#### **7.1.1 Notación utilizada**

Con la opinión de los expertos y la información recolectada del proyecto se construyó la tabla 3. En dicha tabla se muestran los valores asignados a los parámetros del modelo y se expone una breve explicación del porqué de cada elección.

Tabla 3. Notación utilizada en el desarrollo del modelo.

Fuente: Elaboración propia

PARÁMETRO	VALOR	EXPLICACIÓN
<b>Relacionados con el proyecto</b>		
<b>n</b>	20	Como se mencionó anteriormente el proyecto caso de estudio consta de 20 actividades descritas en la tabla 1.
<b>L</b>	4	En la figura 3 que muestra la red del proyecto pueden evidenciarse las cuatro rutas que lo componen.
<b>Td</b>	67	El tiempo de terminación esperado para la construcción de la vía es de 4 meses, por ende se tomó como referencia los días de estos meses sin tener en cuenta los sábados, domingos y festivos.
<b>CL</b>	90%	La probabilidad deseada para la terminación del proyecto fue sugerida por los expertos consultados.
$\mu_{ij}, \sigma_{ij}$	-	Las duraciones medias de cada actividad y su respectiva desviación se presentan en la tabla 4.
$C_{ij}$	-	Los costos de cada una de las actividades se presentan en la tabla 1.
$S_{ij}$	-	La pendiente del costo para cada actividad se evalúa con la ayuda de la siguiente formula: $S_{ij} = -\frac{\Delta Costo}{\Delta \mu_{ij}}$
<b>Relacionados con el algoritmo</b>		
<b>m</b>	100	La definición de estos parámetros puede verse en el capítulo 7.1.3 titulado Ajuste de parámetros ACO
<b><math>\alpha</math></b>	1	
<b><math>\beta</math></b>	1.2	
<b><math>\rho</math></b>	0,99	

### 7.1.2 Distribución para la duración de las actividades

Se utilizó distribución normal para describir la duración de las actividades del proyecto. Los parámetros necesarios para esta distribución son la media de las

actividades y su desviación estándar. Para ello, se consultó a dos expertos que definieron tres valores: duración mínima, más probable y duración máxima para las actividades desarrolladas de forma normal y aceleradas y con estos se calcularon los parámetros mencionados.

En la tabla 4 se muestran los valores mínimo, más probable y máximo de las duraciones de las actividades del proyecto desarrolladas en forma normal y representan el promedio de las estimaciones facilitadas por los expertos. Por otro lado, en la tabla 5 se exponen los mismos valores para las actividades del proyecto desarrolladas de forma acelerada.

*Tabla 4. Normalización de actividades desarrolladas en forma normal. Promedio de expertos.*

<b>Actividades</b>	<b>Min</b>	<b>Más Prob</b>	<b>Max</b>	<b><math>\mu</math> (u)</b>	<b><math>\sigma</math>(u)</b>
<b>Construcción vía</b>					
Localización nivelación y replanteo de vía	1	2	4	2,17	0,50
Excavaciones a máquina en cualquier tipo de material	8	10	13	10,17	0,83
Conformación y compactación de la sub-rasante	1	1	3	1,33	0,33
Rellenos en roca muerta para mejoramiento y nivelación de la sub-rasante compactados al 95%	1	2	5	2,33	0,67
Sub-base granular compactado al 95%, debe cumplir norma Invias 320	2	4	8	4,33	1,00
Base granular compactada al 100% del PM para vías, debe cumplir norma Invias 330	2	3	5	3,17	0,50
<b>Red sanitaria</b>					
Localización y replanteo de redes de alcantarillado	1	1	3	1,33	0,33
Excavación en tierra en seco a máquina entre 0 y 2 metros de profundidad	3	8	9	7,33	1,00
Suministro y colocación de triturado o grava de río para cimentación de tuberías	1	3	7	3,33	1,00
Instalación de tubería de alcantarillado PVC corrugada $\varnothing$ 8" (200mm)	1	3	7	3,33	1,00

Conexiones domiciliarias de alcantarillado.	7	13	18	12,83	1,83
Cajas domiciliarias de inspección en concreto.	3	7	12	7,17	1,50
Cámara de inspección alcantarillado altura cilindro de 1,01 a 1,5 metros, incluye losa y tapa.	3	7	12	7,17	1,50
Cámara de inspección alcantarillado altura cilindro de 1,51 a 2 metros incluye losa y tapa prefabricada.	8	12	16	12,00	1,33
Relleno con material seleccionado de la excavación compactado al 90%	7	12	17	12,00	1,67
Conformación y compactación de sub-rasante	1	2	4	2,17	0,50
Relleno con material importado compactado al 95%	1	3	5	3,00	0,67
<b>Construcción andén</b>					
Excavaciones de andén eje 3	4	8	15	8,50	1,83
Conformación y compactación de la sub-rasante andén eje 3	4	7	8	6,67	0,67
Rellenos en roca muerta para mejoramiento y nivelación de la sub-rasante compactados al 95% andén eje 3	6	11	15	10,83	1,50

*Fuente: Elaboración propia con base en información de expertos.*

*Tabla 5. Normalización de actividades desarrolladas en forma acelerada. Promedio de expertos.*

<b>Actividades</b>	<b>Min</b>	<b>Más Prob</b>	<b>Max</b>	<b><math>\mu</math> (I)</b>	<b><math>\sigma</math> (I)</b>
<b>Construcción vía</b>					
Localización nivelación y replanteo de vía	1	1	3	1,33	0,33
Excavaciones a máquina en cualquier tipo de material	2	6	9	5,83	1,17
Conformación y compactación de la sub-rasante	1	1	2	1,17	0,17
Rellenos en roca muerta para mejoramiento y nivelación de la sub-rasante compactados al 95%	1	1	4	1,50	0,50
Sub-base granular compactado al 95%, debe cumplir norma Invias 320	1	2	5	2,33	0,67
Base granular compactada al 100% del PM para vías, debe cumplir norma Invias 330	1	2	3	2,00	0,33

<b>Red sanitaria</b>					
Localización y replanteo de redes de alcantarillado	1	1	2	1,17	0,17
Excavación en tierra en seco a máquina entre 0 y 2 metros de profundidad	2	6	7	5,50	0,83
Suministro y colocación de triturado o grava de río para cimentación de tuberías	1	1	6	1,83	0,83
Instalación de tubería de alcantarillado PVC corrugada ø8" (200mm)	1	1	5	1,67	0,67
Conexiones domiciliarias de alcantarillado.	4	8	15	8,50	1,83
Cajas domiciliarias de inspección en concreto.	2	5	11	5,50	1,50
Cámara de inspección alcantarillado altura cilindro de 1,01 a 1,5 metros, incluye losa y tapa.	1	4	9	4,33	1,33
Cámara de inspección alcantarillado altura cilindro de 1,51 a 2 metros incluye losa y tapa prefabricada.	5	9	12	8,83	1,17
Relleno con material seleccionado de la excavación compactado al 90%	4	9	13	8,83	1,50
Conformación y compactación de sub-rasante	1	1	2	1,17	0,17
Relleno con material importado compactado al 95%	1	2	3	2,00	0,33
<b>Construcción andén</b>					
Excavaciones de andén eje 3	3	7	13	7,33	1,67
Conformación y compactación de la sub-rasante andén eje 3	1	3	6	3,17	0,83
Rellenos en roca muerta para mejoramiento y nivelación de la sub-rasante compactados al 95% andén eje 3	4	10	12	9,33	1,33

*Fuente: Elaboración propia con base en información de expertos.*

### 7.1.3 Ajuste de parámetros ACO

Para realizar el ajuste de parámetros se inició el modelo con los valores propuestos por Komarudin para la programación de proyectos, los cuales son:  $\rho=0.975$ ,  $\alpha=1$ ,  $\beta=1$ ,  $m=5$  y se definió la cantidad de iteraciones en diez.



Otro aspecto importante que se hace necesario mencionar es que para realizar el ajuste de parámetros se utilizó una ruta al azar del proyecto en la que se adoptó un enfoque de prueba y error como el realizado por (Kalhor et al., 2011) para encontrar valores de parámetros que arrojen resultados consistentes para el modelo.

El primer valor que se definió fue el valor de  $\rho$ , para este se tomaron valores de prueba desde  $\rho=0.05$  hasta  $\rho=1$ . Se observó que este parámetro tuvo resultados muy consistentes dentro de los valores de 0.8 y 1, sin embargo, al probar valores intermedios entre estos se encuentra que el programa es mucho más estable y obtiene mejores resultados con un valor de  $\rho=0.99$ . En comparación, con valores menores a 0.8 se observó que el programa no encontraba soluciones factibles para el modelo.

Luego, se probaron valores para el parámetro  $\alpha$  desde  $\alpha=0.05$  hasta  $\alpha=5$ . Para este parámetro se obtuvo que el modelo se estabiliza con valores de  $\alpha$  entre 0.5 y 1, sin embargo, al probar valores intermedios se puede observar que el mejor resultado se encuentra con un  $\alpha=1$ .

Después, se definió el valor de  $\beta$ , para este parámetro se tomaron valores de prueba desde  $\beta=0.05$  hasta  $\beta=5$ . El modelo presentó muy buenos resultados cuando este valor se encuentra entre 0.7 y 1.5, sin embargo, los mejores resultados se ven reflejados cuando se tiene un valor de  $\beta=1.2$ .

Por último, se evaluaron diferentes valores para el número de hormigas y de iteraciones considerando una combinación de ambos parámetros. Las combinaciones de prueba fueron las siguientes:  $m=5$  e  $It=10$ ,  $m=50$  e  $It=100$ ,  $m=100$  e  $It=250$ ,  $m=50$  e  $It=1000$ . Las ejecuciones mostraron que para la pareja  $m=100$  e  $It=250$  se tuvo una menor variación en la factibilidad de las soluciones y en el costo de estas.

Finalmente, el conjunto de valores seleccionado para los parámetros ACO es  $\rho=0.99$ ,  $\alpha=1$  y  $\beta=1.2$   $m=100$  e  $l_t=250$ . Con estos valores se ejecutó el programa en las secciones siguientes.

## 7.2 Fase 2. Determinación de la ruta más crítica

Se realizó simulación Monte Carlo con el complemento @Risk, para el 100% de avance en el proyecto. Se programaron 5000 iteraciones y se tomó como variable de salida la duración total del proyecto. Como resultado de la simulación se obtuvieron los índices de criticidad para cada una de las actividades del proyecto, los cuales se muestran en la tabla 6.

Tabla 6. Índices de criticidad para las actividades del proyecto.

Actividades	Índice de criticidad
<b>Construcción vía</b>	n/a
Localización nivelación y replanteo de vía	100%
Excavaciones a máquina en cualquier tipo de material	100%
Conformación y compactación de la sub-rasante	100%
Rellenos en roca muerta para mejoramiento y nivelación de la sub-rasante compactados al 95%	100%
Sub-base granular compactado al 95%, debe cumplir norma Invias 320	100%
Base granular compactada al 100% del PM para vías, debe cumplir norma Invias 330	100%
<b>Red sanitaria</b>	n/a
Localización y replanteo de redes de alcantarillado	100%
Excavación en tierra en seco a máquina entre 0 y 2 metros de profundidad	100%
Suministro y colocación de triturado o grava de río para cimentación de tuberías	100%
Instalación de tubería de alcantarillado PVC corrugada ø8" (200mm)	100%

Conexiones domiciliarias de alcantarillado.	100%
Cajas domiciliarias de inspección en concreto.	1,50%
Cámara de inspección alcantarillado altura cilindro de 1,01 a 1,5 metros, incluye losa y tapa.	1,38%
Cámara de inspección alcantarillado altura cilindro de 1,51 a 2 metros incluye losa y tapa prefabricada.	97,12%
Relleno con material seleccionado de la excavación compactado al 90%	100%
Conformación y compactación de sub-rasante	100%
Relleno con material importado compactado al 95%	100%
<b>Construcción andén</b>	n/a
Excavaciones de andén eje 3	0%
Conformación y compactación de la sub-rasante andén eje 3	0%
Rellenos en roca muerta para mejoramiento y nivelación de la sub-rasante compactados al 95% andén eje 3	0%
<b>Entrega</b>	n/a
Entrega	100%

*Fuente: Elaboración propia*

Los índices de criticidad extraídos de la simulación indican la probabilidad de que una actividad forme parte de la ruta crítica en la red. Teniendo en cuenta esto, las actividades con mayor índice crítico forman parte de la ruta crítica que se evaluó con el algoritmo ACO. Estas actividades son: Localización, Excavación, Conformación y Rellenos de la vía y de la red sanitaria, Sub-base y Base de la vía, Suministro, Instalación, Conexiones domiciliarias y Cámaras de 1,5 a 2m de la red sanitaria.

Adicionalmente se aplicó el algoritmo a cada una de las rutas sin importar si esta era crítica o no, con el objetivo de comparar los resultados de la aceleración de actividades para cada ruta presente en la red.

### 7.3 Fase 3. Determinación de las actividades a acelerar

Como se mencionó anteriormente, se determinaron las actividades a acelerar dentro del proyecto por medio del algoritmo ACO. Sin embargo, antes de aplicarlo se realizaron ajustes a algunas de las ecuaciones presentadas en el capítulo 5 que se mencionaran más adelante. Para la ejecución del algoritmo se utilizó MATLAB.

#### 7.3.1 Estrategias para cada actividad

Se usaron las estrategias propuestas por (Aghaie & Mokhtari, 2009), lo cual indica que cada hormiga solo tiene dos opciones: FCS y NCS para cada actividad. En consecuencia, para que las hormigas elijan entre estas estrategias se sumaron las probabilidades calculadas mediante las ecuaciones 8 y 9. Luego, se generó un número aleatorio, el cual de ser menor o igual a la probabilidad FCS elegiría acelerar la actividad, de lo contrario se opta por la estrategia NCS.

#### 7.3.2 Formulación matemática

Debido a que la distribución utilizada por (Aghaie & Mokhtari, 2009) fue la distribución exponencial, la cual solo cuenta con un parámetro ( $\lambda_{ij}$ ) equivalente a la duración media de las actividades y la distribución usada en el presente trabajo de grado para la duración de las actividades fue la distribución normal, con parámetros media y desviación se realizaron ajustes con relación a la información de entrada para el programa reflejados en las ecuaciones que se mostraran a continuación.

La expresión matemática que describe el modelo se ajustó con estos parámetros de la siguiente manera:

$$\text{Min } Z = \sum_{ij \in r} [\xi_{ij} \times S_{ij} \times (\mu_{ij}^u - \mu_{ij}^l) + C_{ij}] \quad (15)$$

Sujeto a:

$$\frac{T_d - \sum_{ij \in r} [\xi_{ij} \times \mu_{ij}^l + (1 - \xi_{ij}) \times \mu_{ij}^u]}{\sqrt{\sum_{ij \in r} [\xi_{ij} \times \sigma_{ij}^l + (1 - \xi_{ij}) \times \sigma_{ij}^u]^2}} \geq Z_{1-CL} \quad (16)$$

$$\xi_{ij} = 0 \text{ o } 1 \quad (17)$$

### 7.3.3 Optimización colonia de hormigas

De igual manera que en la sección anterior se ajustaron las ecuaciones para el elemento de visibilidad ( $\eta_{ij}$ ) y para la actualización de las feromonas ( $\Delta\tau_{ij}^K$ ) debido a los parámetros de la distribución utilizada. Las ecuaciones quedaron de la siguiente manera:

$$\eta_{ij}^F = \frac{1}{S_{ij} \times (\mu_{ij}^u - \mu_{ij}^l) + C_{ij}} \quad (18)$$

$$\Delta\tau_{ij}^K = \frac{Q^k}{\sum_{ij \in RMC} [\xi_{ij} \times S_{ij} \times (\mu_{ij}^u - \mu_{ij}^l)] + \varepsilon} \quad (19)$$

## 7.4 Resultados del modelo

Se llevó a cabo el análisis de los resultados en dos etapas. En la primera etapa se ejecutó el programa en la ruta crítica obtenida a través de la simulación Monte Carlo y se compararon sus resultados ejecutando el programa en las otras rutas de la red. Por otro lado, en la segunda etapa se analizó el algoritmo en términos de la probabilidad de terminación (CL) y la fecha definida de terminación (Td).

#### **7.4.1 Primera etapa**

En lo que respecta a la primera etapa, los resultados de la aplicación del programa propuesto se presentan en las tablas 7 y 8. De acuerdo con la tabla 7, el orden de criticidad de las rutas en las filas, se seleccionó de los resultados obtenidos con la simulación. El algoritmo ACO se aplicó a estas rutas para mejorar su probabilidad de terminación hasta el CL definido. Se realizaron tres corridas mostradas en las columnas de la tabla, para cada una de las rutas donde se registró el costo y la probabilidad de terminación. Luego, se seleccionó el mejor resultado obtenido; cabe destacar que este resultado es solo el costo adicional que tendría cada ruta.

Por otro lado, la tabla 8 proporciona las estrategias (FCS y NCS) para las actividades del proyecto obtenidas del algoritmo ACO propuesto.

Tabla 7. Resultados de la aplicación del modelo.

Ruta	Orden de criticidad	Corrida 1		Corrida 2		Corrida 3		Mejor resultado	
		Costo	Probabilidad	Costo	Probabilidad	Costo	Probabilidad	Costo	Probabilidad
<b>Ruta crítica</b>	1	\$262.627.409	90,82%	\$261.445.943	90,99%	\$281.277.732	90,15%	\$261.445.943	90,99%
<b>Ruta 2</b>	2	\$244.562.771	92,07%	\$234.912.139	90,15%	\$244.488.795	91,15%	\$234.912.139	90,15%
<b>Ruta 3</b>	3	\$236.314.239	92,36%	\$246.166.771	92,07%	\$235.355.884	90,99%	\$235.355.884	90,99%
<b>Ruta 4</b>	4	\$170.886.807	100,00%	\$170.886.807	100,00%	\$170.886.807	100,00%	\$170.886.807	100%

Fuente: Elaboración propia

Tabla 8. Estrategias seleccionadas por el algoritmo ACO

Item	Actividades	Precedencia	Estrategia ruta crítica	Estrategia ruta 2	Estrategia ruta 3
	<b>Construcción vía</b>				
<b>A</b>	Localización nivelación y replanteo de vía	-	NCS	FCS	NCS
<b>B</b>	Excavaciones a máquina en cualquier tipo de material	A	FCS	NCS	NCS
<b>C</b>	Conformación y compactación de la sub-rasante	B	NCS	NCS	NCS
<b>D</b>	Rellenos en roca muerta para mejoramiento y nivelación de la sub-rasante compactados al 95%	C	NCS	NCS	NCS
<b>E</b>	Sub-base granular compactado al 95%, debe cumplir norma Invias 320	D	NCS	NCS	NCS
<b>Q</b>	Base granular compactada al 100% del PM para vías, debe cumplir norma Invias 330	P	NCS	NCS	NCS
	<b>Red sanitaria</b>				
<b>F</b>	Localización y replanteo de redes de alcantarillado	E	FCS	NCS	NCS

<b>G</b>	Excavación en tierra en seco a máquina entre 0 y 2 metros de profundidad	F	NCS	FCS	NCS
<b>H</b>	Suministro y colocación de triturado o grava de río para cimentación de tuberías	G	FCS	FCS	FCS
<b>I</b>	Instalación de tubería de alcantarillado PVC corrugada ø8" (200mm)	H	NCS	NCS	NCS
<b>J</b>	Conexiones domiciliarias de alcantarillado.	N	FCS	FCS	FCS
<b>K</b>	Cajas domiciliarias de inspección en concreto.	J	-	NCS	-
<b>L</b>	Cámara de inspección alcantarillado altura cilindro de 1,01 a 1,5 metros, incluye losa y tapa.	J	-	-	FCS
<b>M</b>	Cámara de inspección alcantarillado altura cilindro de 1,51 a 2 metros incluye losa y tapa prefabricada.	J	FCS	-	-
<b>N</b>	Relleno con material seleccionado de la excavación compactado al 90%	I	FCS	FCS	FCS
<b>O</b>	Conformación y compactación de sub-rasante	K-L-M	FCS	FCS	FCS
<b>P</b>	Relleno con material importado compactado al 95%	O	FCS	FCS	FCS
	<b>Construcción andén</b>				
<b>R</b>	Excavaciones de andén eje 3	E	-	-	-
<b>S</b>	Conformación y compactación de la sub-rasante andén eje 3	R	-	-	-
<b>T</b>	Rellenos en roca muerta para mejoramiento y nivelación de la sub-rasante compactados al 95% andén eje 3	S	-	-	-

Fuente: Elaboración propia



De la tabla 8 se puede evidenciar que las tres primeras rutas, en las cuales el algoritmo ACO eligió diferentes estrategias por actividad coinciden en no acelerar 9 actividades correspondientes a los ítems C, D, E, Q de la construcción de la vía; I, K de la red sanitaria y R, S, T de la construcción del andén. Además, coinciden en acelerar 5 actividades correspondientes a los ítems H, J, N, O, P de la red sanitaria.

Dado que la ruta 4 cumple la fecha de terminación deseada y con la probabilidad requerida sin necesidad de acelerar sus actividades el algoritmo reafirmo esta condición y no acelero ninguna de las actividades que hacen parte de esta ruta, por lo cual esta ruta no se tuvo en cuenta en esta tabla.

Por otra parte, como se muestra en la tabla 7 el mejor resultado obtenido es el de la ruta 4 puesto que su costo es el menor \$170.886.807 y posee la probabilidad más alta de cumplir con la fecha de terminación definida, sin embargo, para esta ruta el algoritmo eligió no acelerar ninguna de sus actividades.

En contraste con los resultados de la simulación, se confirma que esta ruta no necesita acelerarse puesto que tres de las ocho actividades que la componen poseen un índice de criticidad de 0%, lo que indica que esta ruta tiene una holgura suficiente para cumplir con la fecha de terminación definida sin necesidad de ningún costo adicional.

De igual manera, si se comparan los índices de criticidad obtenidos en la simulación de las cajas domiciliarias (1,50%), las cámaras de 1 a 1,5 metros (1,38%) y las cámaras de 1,5 a 2 metros (97,12%); actividades en las que difieren las tres primeras rutas, se puede evidenciar que los dos primeros, correspondientes a las rutas 2 y 3 respectivamente son muy bajos en comparación con el de la ruta 1.

Con referencia a lo anterior, las actividades para las rutas 2 y 3 poseen una holgura suficiente para realizarse simultáneamente con las cámaras de 1,5 a 2 metros, por el contrario, la actividad de la ruta 1 no posee tal holgura, lo cual indica que hace

parte de la ruta crítica y si esta llegase a retrasarse se vería afectada la probabilidad de terminar en la fecha establecida.

Por consiguiente, comparar los resultados para cada una de las rutas no refleja un análisis muy acertado, dado que en este caso las rutas con las mejores soluciones representadas en los menores costos poseen actividades con índices de criticidad muy pequeños, y en efecto, estas actividades tienen una muy baja probabilidad de convertirse en críticas. Por el contrario, la ruta 1 que refleja los costos más altos representa la ruta crítica de la red y está determinando la duración total del proyecto.

Debido a las consideraciones anteriores, se hizo necesario realizar un análisis de los efectos que trae consigo acelerar cada una de las rutas sobre las demás.

En consecuencia, una vez obtenidas las estrategias de aceleración para cada actividad y por cada una de las rutas se ejecutó nuevamente el modelo con las siguientes condiciones:

1. Con la solución dada para la ruta 1 (ruta crítica), es decir, acelerando las actividades que esta solución propone se ejecutaron las rutas 2 y 3. Asimismo, para la solución dada para la ruta 2 se ejecutaron las rutas 1 y 3 y para la solución dada para la ruta 3 se ejecutaron las rutas 1 y 2.
2. No se tuvo en cuenta la ruta 4 ya que esta presenta actividades con baja probabilidad de ser críticas y los resultados anteriores permiten concluir que la ruta presenta la holgura suficiente para cumplir con el CL propuesto.

Estas ejecuciones del algoritmo ACO se realizaron con el fin de validar si con los resultados obtenidos al analizar las rutas por si solas, es totalmente valido tomar decisiones sobre qué actividades es conveniente acelerar. Además, comprobar si con los resultados obtenidos anteriormente se satisfacen todas las rutas.

Tabla 9. Comportamiento de los resultados tras acelerar actividades en las diferentes rutas

		Ruta crítica		Ruta 2		Ruta 3	
Ruta	Secuencia de actividades	Probabilidad	Acelerar	Probabilidad	Acelerar	Probabilidad	Acelerar
<b>Critica</b>	A-B-C-D-E-F- G-H-I-J-M-N- O-P-Q	-	-	95,82%	No	95,82%	No
<b>2</b>	A-B-C-D-E-F- G-H-I-J-K-N- O-P-Q	91,62%	Si	-	-	90,15%	No
<b>3</b>	A-B-C-D-E-F- G-H-I-J-L-N- O-P-Q	90,15%	Si	90,82%	Si	-	-

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 9 se muestran los resultados obtenidos en la segunda ejecución del algoritmo. En las rutas que aparecen en las filas algunas de sus actividades ya se encuentran aceleradas adoptando los resultados mostrados en la tabla 8. En las columnas se muestran las rutas que se ejecutaron para validar si se debían acelerar más actividades o si, por el contrario, con la solución inicial era suficiente para cumplir con el proyecto.

Como puede verse, la aceleración de actividades para la ruta crítica es suficiente para cumplir con la red del proyecto, es decir, que no se requiere acelerar más actividades en ninguna otra ruta para cumplir con este, además se cumple con la fecha predeterminada y todas las rutas que componen la red del proyecto a su vez están cumpliendo con la probabilidad deseada.

Por otro lado, en las dos rutas restantes se observa que ambas requieren de acelerar actividades al menos en una ruta más, como, por ejemplo, en el caso de la ruta 2, lo que implicaría a su vez incrementar el costo adicional total. Esto quiere decir, verbigracia que si inicialmente se opta por acelerar las actividades que nos plantea el algoritmo a la ruta 2 por ser uno de los menores costos se deben considerar costos adicionales por acelerar actividades de la ruta 1 que no estarían cumpliendo con la fecha determinada a menos que se acelere.

Ciertamente, mientras mayor sea el índice de criticidad de una actividad, más probable será que una reducción en la duración de dicha actividad impacte sobre la duración total. Por tanto, la simulación permitió priorizar entre las rutas presentes en el proyecto la más crítica y sobre la cual se evidenció que es más eficiente aplicar el algoritmo ACO propuesto.

## 7.4.2 Segunda etapa

En la segunda etapa se desarrolló el análisis del algoritmo en términos de CL y Td, para esto se construyeron dos escenarios en los que se asignan diferentes valores a estos parámetros. Estos escenarios son evaluados en la ruta crítica de la red, puesto que como se mencionó en el análisis anterior los cambios efectuados en dicha ruta impactan en el cumplimiento de todas las rutas que forman parte de la red del proyecto.

### 7.4.2.1 Escenario 1

En el primer escenario, se ajusta Td a 55 días equivalentes a 3 meses y medio sin contar los fines de semana o festivos. Esta fecha es menor a la prevista para la entrega del proyecto y se evalúan diferentes valores para CL. En la tabla 10 se muestran los resultados obtenidos para este escenario.

Tabla 10. Comportamiento del costo y las actividades a acelerar para diferentes niveles de CL y Td=55

CL	50%		65,54%	
Td	Costo	# actividades acelerar	Costo	# actividades a acelerar
55 días	\$303.775.044	13	\$310.246.903	15

Fuente: Elaboración propia

De la tabla 10 se tiene que para valores flexibles en CL como por ejemplo el 50% aquí mostrado, 13 actividades de las 15 pertenecientes a la ruta crítica deben acelerarse con un costo de \$303.775.044, para valores menores al 50% tanto el

costo como el número de actividades por acelerar disminuyen. Asimismo, el máximo CL permitido para poder cumplir con el Td de 55 días es de 65,54% en el que el algoritmo está eligiendo acelerar todas las actividades pertenecientes a la ruta crítica.

En efecto, disminuir el valor de Td va a obligar al algoritmo a acelerar más actividades de la ruta crítica con el propósito de entregar el proyecto en esa fecha prevista, lo que conlleva a aumentar el costo del mismo. En contraste, si se disminuye la Td, la CL va a disminuir también, pues las probabilidades de cumplir en un menor tiempo al proyectado dependen de la duración de las actividades aun si se aceleran, es por eso que, para este caso a pesar de acelerar todas las actividades de la ruta crítica de la red, no puede darse un 100% de probabilidad de que el proyecto se entregue a los 55 días.

Otro aspecto importante a destacar es que al disminuir el CL el número de actividades que deben acelerarse y por ende el costo disminuye también, esto es debido a que al ser baja la probabilidad requerida para que termine en esa fecha, el algoritmo se abstiene de acelerar actividades en pro de disminuir el costo adicional pues las expectativas de que termine en ese Td no son altas.

#### **7.4.2.2 Segundo escenario**

Para el segundo escenario, se propone evaluar el Td utilizado en el desarrollo del modelo que es igual a 67 días equivalente a 4 meses y de igual manera que en el caso anterior se proponen diferentes valores para CL. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 11.

Tabla 11. Comportamiento del costo y las actividades a acelerar para diferentes niveles de CL y Td=67

CL	50%		70%		95%	
Td	Costo	#actividades a acelerar	Costo	#actividades a acelerar	Costo	#actividades a acelerar
67 días	\$250.430.471	5	\$256.232.567	6	\$267.871.356	9

Fuente: Elaboración propia

La tabla 11 presenta los diferentes costos y el número de actividades que se requiere acelerar para cumplir con el Td y el CL evaluados. Como puede verse para mayores valores en el CL se aumenta el costo adicional de la ruta.

Si se comparan los resultados obtenidos en este escenario con los del anterior es posible afirmar lo siguiente:

Td se relaciona inversamente con el número de actividades que se deben acelerar en la ruta. En el escenario anterior un Td apretado obliga al algoritmo a acelerar más actividades, en este escenario un Td más holgado le permite al algoritmo acelerar menos actividades.

Td está directamente relacionado con el CL, así en el primer escenario un Td apretado hace que el CL tome valores bajos pues las probabilidades de cumplir en esa fecha se van acortando aun si se aceleran todas las actividades, en este escenario un Td más holgado permite que el CL aumente puesto que hay más probabilidad de que se pueda cumplir con dicha fecha.

CL está directamente relacionado con el número de actividades a acelerar y con el costo. Un CL flexible disminuye el número de actividades a acelerar y a su vez el costo, por otro lado, un CL más exigente aumenta el número de actividades por acelerar y el costo de la ruta como se muestra en ambos escenarios.

## 8 CONCLUSIONES

Gracias a la revisión bibliográfica se identificaron diferentes propuestas metodológicas para la aceleración de actividades en proyectos, siendo los algoritmos genéticos los más utilizados. Sin embargo, las propuestas identificadas que fueron modeladas por medio del algoritmo colonia de hormigas propenden en sus funciones objetivos la minimización del tiempo, del costo o de ambos elementos, además de tener aplicaciones para proyectos con un número alto de actividades.

La metodología aplicada le permite al proyectista crear diferentes escenarios en los cuales puede ajustar tanto la probabilidad con la cual desea que termine el proyecto, como la fecha de terminación del mismo y como resultado de estos escenarios obtener diferentes alternativas de costos entre las cuales puede elegir para la planificación y programación de proyectos.

El uso de la simulación Monte Carlo permite obtener el índice de criticidad de las diferentes actividades que componen un proyecto y por consiguiente obtener las rutas más críticas del mismo. Este método le proporciona al proyectista una herramienta para priorizar las rutas en las cuales debe enfocar los esfuerzos para la aceleración de las actividades.

Como resultado de la aplicación de la metodología, se puede concluir que el tiempo de finalización del proyecto ( $T_d$ ) y la probabilidad de terminación deseada (CL) tiene un impacto directo sobre el costo total del proyecto, ya que, entre mayor sea el  $T_d$  y menor CL el costo total va a ser menor. Por el contrario, entre menor sea el  $T_d$  y mayor el CL el costo total aumentará. Estos dos parámetros determinan la flexibilidad o severidad con la que encuentra soluciones el algoritmo.

La aplicación de la simulación Monte Carlo determinó la ruta crítica de la red y evidenció que hay actividades con índices de criticidad tan bajos que la o las rutas de las que hacen parte no requieren acelerar ninguna de sus actividades pues poseen la holgura suficiente para cumplir con la probabilidad y la fecha de

terminación deseada. Asimismo, al tener rutas que presentan gran cantidad de actividades en común incluyendo la ruta crítica, puede concluirse que al acelerar dicha ruta se obtendrán grandes beneficios para las rutas restantes llegando incluso a que no exista la necesidad de acelerar más actividades para cumplir con la probabilidad de finalización del proyecto.

Aunque se solicitó la ayuda de varios expertos sólo dos contribuyeron con la información para este trabajo de grado. Para futuras investigaciones, se recomienda calcular la distribución de probabilidad para la duración de las actividades con un mayor número de expertos o con un conjunto grande de datos históricos, teniendo en cuenta que algunas de las actividades desarrolladas en proyectos de construcción de vías suelen ser similares.

El caso de estudio en el cual se aplicó la metodología es un proyecto pequeño en el que las conexiones de las actividades en la red solo dieron espacio a cuatro rutas con notables diferencias en los índices de criticidad de las actividades que las componían y diferenciaban. De acuerdo con esto, se propone en futuros trabajos evaluar la aplicación del algoritmo en proyectos con más rutas en la red y en los cuales las rutas semi-críticas del mismo presenten actividades con índices de criticidad que no se alejen tanto de los de la ruta crítica.



## 9 REFERENCIAS

- Afruzzi, E. N., Roghanian, E., Najafi, A. A., & Mazinani, M. (2013). A multi-mode resource-constrained discrete time-cost tradeoff problem solving using an adjusted fuzzy dominance genetic algorithm. *Scientia Iranica*, 20(3), 931–944. <https://doi.org/10.1016/j.scient.2012.12.024>
- Aghaie, A., & Mokhtari, H. (2009). Ant colony optimization algorithm for stochastic project crashing problem in PERT networks using MC simulation. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 45(11–12), 1051–1067. <https://doi.org/10.1007/s00170-009-2051-6>
- Aminbakhsh, S., & Sonmez, R. (2016). Discrete particle swarm optimization method for the large-scale discrete time-cost trade-off problem. *Expert Systems with Applications*, 51, 177–185. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2015.12.041>
- CAMACOL. (2017). Tendencias de la Construcción, 10. Recuperado a partir de [https://camacol.co/sites/default/files/IE-Tendencias/TENDENCIAS ED 10 - JULIO 28 - PARA WEB-.pdf](https://camacol.co/sites/default/files/IE-Tendencias/TENDENCIAS_ED_10_JULIO_28_PARA_WEB-.pdf)
- Caracol Radio. (2017a). En Cali las obras atrasadas generan enormes sobrecostos. Recuperado a partir de [http://caracol.com.co/emisora/2017/03/11/cali/1489256424\\_718844.html](http://caracol.com.co/emisora/2017/03/11/cali/1489256424_718844.html)
- Caracol Radio. (2017b). Obras de Metroplús y vías de valorización con demoras en Medellín. Recuperado a partir de [http://caracol.com.co/emisora/2017/03/11/medellin/1489246089\\_862609.html](http://caracol.com.co/emisora/2017/03/11/medellin/1489246089_862609.html)
- Carcaño, S., Delgadillo, M., & Fajardo, J. G. (2009). Estudio de caso : demoras en la construcción de un proyecto en México. *Ingeniería, revista académica*, 13, 41–48.
- DANE. (2015). Indicador De Inversión En Obras Civiles. *Dane*, 1–13. Recuperado a

partir de  
[http://www.dane.gov.co/files/investigaciones/boletines/obras/bol\\_obr\\_civi\\_ltrim12.pdf](http://www.dane.gov.co/files/investigaciones/boletines/obras/bol_obr_civi_ltrim12.pdf)

DANE. (2017). Boletín técnico construcción - IEAC II trimestre de 2017 Boletín técnico, 7. Recuperado a partir de [https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/boletines/pib\\_const/Bol\\_ieac\\_ltrim17.pdf](https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/boletines/pib_const/Bol_ieac_ltrim17.pdf)

Díaz Martín, Á. (2010). *El arte de dirigir proyectos*. (Alfaomega Grupo Editor, Ed.) (tercera ed). Méxoco D.F.

El Tiempo. (2016). Obras e infraestructura sin terminar en Colombia - Archivo Digital de Noticias de Colombia y el Mundo desde 1.990 - eltiempo.com. Recuperado el 13 de diciembre de 2017, a partir de <http://www.eltiempo.com/archivo/documento/CMS-16534744>

Eshtehardian, E., Afshar, A., & Abbasnia, R. (2009). Fuzzy-based MOGA approach to stochastic time-cost trade-off problem. *Automation in Construction*, 18(5), 692–701. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2009.02.001>

Gerk, J. E. V., & Qassim, R. Y. (2008). Project acceleration via activity crashing, overlapping, and substitution. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 55(4), 590–601. <https://doi.org/10.1109/TEM.2008.927786>

Ghoddousi, P., Eshtehardian, E., Jooybanpour, S., & Javanmardi, A. (2013). Multi-mode resource-constrained discrete time-cost-resource optimization in project scheduling using non-dominated sorting genetic algorithm. *Automation in Construction*, 30, 216–227. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2012.11.014>

Göçken, T. (2013). Solution of fuzzy multi-objective project crashing problem. *Neural Computing and Applications*, 23(7–8), 2167–2175. <https://doi.org/10.1007/s00521-012-1167-z>

- Kalhor, E., Khanzadi, M., Eshtehardian, E., & Afshar, A. (2011). Stochastic time-cost optimization using non-dominated archiving ant colony approach. *Automation in Construction*, 20(8), 1193–1203. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2011.05.003>
- Ke, H., & Ma, J. (2014). Modeling project time-cost trade-off in fuzzy random environment. *Applied Soft Computing Journal*, 19, 80–85. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2014.01.040>
- Ke, H., Ma, W., & Chen, X. (2012). Modeling stochastic project time-cost trade-offs with time-dependent activity durations. *Applied Mathematics and Computation*, 218(18), 9462–9469. <https://doi.org/10.1016/j.amc.2012.03.035>
- Mokhtari, H., Baradaran Kazemzadeh, R., & Salmasnia, A. (2011). Time-cost tradeoff analysis in project management: An ant system approach. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 58(1), 36–43. <https://doi.org/10.1109/TEM.2010.2058859>
- Monghasemi, S., Nikoo, M. R., Khaksar Fasaee, M. A., & Adamowski, J. (2015). A novel multi criteria decision making model for optimizing time-cost-quality trade-off problems in construction projects. *Expert Systems with Applications*, 42(6), 3089–3104. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2014.11.032>
- Morillo, D., & Moreno, L. (2014). Metodologías Analíticas y Heurísticas para la Solución del Problema de Programación de Tareas con Recursos Restringidos ( RCPSP ): una revisión . Parte 1, 10(19), 247–271. <https://doi.org/10.17230/ingciencia.10.19.12>
- Peng, W., & Yu, H. (2008). DTCTP with renewable and nonrenewable resources. *Chinese Control and Decision Conference, 2008, CCDC 2008*, 170–175. <https://doi.org/10.1109/CCDC.2008.4597292>
- Project Management Institute. (2013). *Guía de los fundamentos para la dirección de proyectos (guía del PMBOK®)*. Project Management Institute, Inc.

<https://doi.org/HD69.P75G845> 2013 658.4'04--dc23 2012046112

Quintana, R., Azimut, R. D. T., Alexander, H., Quintana, R., Ernesto, W., & Vargas, V. (2018). Resumen, 2(2008), 1–11.

Tobergte, D. R., & Curtis, S. (2013). *Administración Exitosa De Proyectos. Journal of Chemical Information and Modeling* (Vol. 53). <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

Xu, J., Zheng, H., Zeng, Z., Wu, S., & Shen, M. (2012). Discrete time-cost-environment trade-off problem for large-scale construction systems with multiple modes under fuzzy uncertainty and its application to Jinping-II Hydroelectric Project. *International Journal of Project Management*, 30(8), 950–966. <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2012.01.019>

Yang, I. T. (2011). Stochastic time-cost tradeoff analysis: A distribution-free approach with focus on correlation and stochastic dominance. *Automation in Construction*, 20(7), 916–926. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2011.03.008>

Zhang, J. W., Xu, Y., & He, Z. W. (2007). Duration/cost trade-offs in project scheduling with time-switch constraints. *Proceedings of 2006 International Conference on Management Science and Engineering, ICMSE'06 (13th)*, (3), 313–317. <https://doi.org/10.1109/ICMSE.2006.313929>