

**PROPUESTA METODOLÓGICA PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE LA
TÉCNICA CRASHING COMO HERRAMIENTA DE ACELERACIÓN DE
PROYECTOS DE CONSTRUCCIÓN**

**RAFAEL DAVID BEJARANO BETANCUR
CRISTIAN CAMILO VASQUEZ**

**UNIVERSIDAD DEL VALLE SEDE BUGA
ESCUELA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
PROGRAMA ACADÉMICO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
GUADALAJARA DE BUGA**

2019

**PROPUESTA METODOLÓGICA PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE LA
TÉCNICA CRASHING COMO HERRAMIENTA DE ACELERACIÓN DE
PROYECTOS DE CONSTRUCCIÓN**

**TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR POR EL TITULO DE
INGENIERO INDUSTRIAL**

**RAFAEL DAVID BEJARANO BETANCUR
CRISTIAN CAMILO VASQUEZ**

**DIRECTOR
ÁLVARO JULIO CUADROS LOPEZ**

**UNIVERSIDAD DEL VALLE SEDE BUGA
ESCUELA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
PROGRAMA ACADÉMICO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
GUADALAJARA DE BUGA**

2019

TABLA DE CONTENIDO

LISTADO DE TABLAS	1
LISTADO DE ILUSTRACIONES	1
RESUMEN	2
INTRODUCCIÓN	3
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	5
2. OBJETIVOS	7
2.1. OBJETIVO GENERAL	7
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	7
3. JUSTIFICACIÓN	8
4. MARCO TEÓRICO	10
4.1. PROYECTOS DE CONSTRUCCIÓN	10
4.1.1. Tipos de obras de construcción	11
4.2. CRASHING	12
4.3. ESTADO DEL ARTE.....	13
5. PROCESO DE CONTRATACIÓN Y CONTROL DE LOS PROYECTOS DE CONSTRUCCIÓN en colombia.....	18
5.1. MARCO LEGAL DEL PROCESO DE CONTRATACIÓN PÚBLICA ...	19
5.2. DESARROLLO DEL PROCESO DE CONTRATACIÓN DE OBRA PÚBLICA	23
5.2.1. Fase de planeación en procesos de contratación de obra pública	25
5.2.2. Fase de selección y evaluación de las propuestas.....	29
5.2.3. Fase de ejecución en procesos de contratación de obra pública	32
6. PROPUESTA METODOLÓGICA PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE LA TÉCNICA CRASHING EN LAS OBRAS DE CONSTRUCCIÓN	36
6.1. PROGRAMACIÓN LINEAL.....	41
6.1.1. Problema de programación lineal	42
6.1.2. Relación entre m y n.....	43
6.1.3. Caracterización de soluciones	43
6.2. MODELO ESTUDIADO PARA EL DESARROLLO DE LA PROPUESTA METODOLÓGICA	44
6.3. DIAGRAMA DE FLECHAS	48
6.4. PROPUESTA METODOLÓGICA.....	49

7.	EVALUACIÓN DE LA PROPUESTA METODOLÓGICA.....	52
7.1.	INTRODUCCIÓN AL CASO DE ESTUDIO.....	52
7.2.	IMPLEMENTACIÓN DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA.....	54
8.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	74
9.	ANEXO	77
10.	BIBLIOGRAFÍA	79

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Métodos para establecer el valor y la forma de pago de los contratos de obra pública.....	28
Tabla 2. Caracterización de soluciones de los problemas de programación lineal.	44
Tabla 3. Costos Unitarios y Totales del proyecto.....	55
Tabla 4. Asociación de actividades con letras y secuencia de precedencia. ...	56
Tabla 5. Calculo del rendimiento de la mano de obra.....	57
Tabla 6. Calculo del rendimiento de la maquinaria.	58
Tabla 7. Asociación de eventos con actividades.....	60
Tabla 8. Calculo de la holgura e identificación de las actividades críticas.	62
Tabla 9. Información suministrada por el experto en relación a la reducción de tiempo en las actividades críticas.....	63
Tabla 10. Duración de las otras rutas del proyecto.....	66
Tabla 11. Pendiente de costo de las actividades del proyecto.....	67
Tabla 12. Resultados obtenidos de la aplicación de la propuesta metodológica.	70

LISTADO DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. División de las actividades de construcción según el CIU.....	18
Ilustración 2. Ejemplo de diagrama de red dibujado utilizando el ADM.	48
Ilustración 3. Estado inicial de la vía la Zapata - Moneterrey.....	52
Ilustración 4. Diagrama de red del proyecto.	59
Ilustración 5. Diagrama de asociación de eventos con actividades.	61
Ilustración 6. Nuevo calendario del proyecto resultado de la aplicación de la técnica Crashing.....	71
Ilustración 7. Relación entre el costo Crashing y el ahorro asociado a la planta eléctrica.	73

RESUMEN

El Crashing es una técnica diseñada para la reducción de tiempos en las actividades de la ruta crítica mediante el aumento o intensificación de los recursos necesarios para realizar dicha actividad. Esta técnica es descrita en varios libros de gestión de proyectos y presenta buenos resultados a nivel internacional en los diferentes tipos de proyectos. Sin embargo, no existe una estandarización a la hora de su implementación debido a las múltiples variables y factores a tener en cuenta que varían de proyecto en proyecto. Por lo que en este trabajo se busca proponer una metodología que logre integrar la técnica Crashing con un modelo matemático de optimización basado en la programación lineal, que permita acelerar proyectos de construcción. Que además, pueda ser empleado tanto por ingeniero de poca o mucha experiencia en la construcción.

PALABRAS CLAVES: Crashing, Aceleración, Desfases, Programación lineal, Obras públicas, Contratación, Diagrama de red, Propuesta metodológica.

INTRODUCCIÓN

Según datos estadísticos, Colombia es un país que ha ido creciendo a nivel económico en los últimos años, esto debido a un aumento en el desarrollo de proyectos (Alderton, 2015). Gracias a esto, los emprendedores están cada vez más conscientes de la importancia de las herramientas de gestión de proyectos, sin embargo, son aun frecuentes los problemas generados por la mala planeación y control.

Según ARQHYS (2012) se declara que “los retrasos en la construcción son a menudo el resultado de la falta de comunicación entre los contratistas, subcontratistas y los dueños de la propiedad. Este tipo de malentendidos y las expectativas poco realistas a nivel general, se evita mediante el uso de programas de ruta crítica detallada, que especifiquen el trabajo y la calendarización de la ejecución del proyecto, pero lo más importante, la secuencia lógica de eventos que deben ocurrir para que un proyecto sea completado”. De tal forma que la correcta gestión y aplicación de técnicas puede disminuir o incluso evitar el riesgo de retraso.

El Crashing es una técnica diseñada para la reducción de tiempos en las actividades de la ruta crítica mediante el aumento o intensificación de los recursos necesarios para realizar dicha actividad. Esta técnica es descrita en varios libros de gestión de proyectos, como en el PMBOK, y presenta buenos resultados a nivel internacional en los diferentes tipos de proyectos. Sin embargo, no existe una estandarización a la hora de su implementación debido a las múltiples variables y factores a tener en cuenta que varían de proyecto en proyecto.

Por lo que en este trabajo se busca proponer una metodología que logre integrar la técnica Crashing con un modelo matemático de optimización basado en la programación lineal, que permita acelerar proyectos de construcción. Que además, pueda ser empleado tanto por ingeniero de poca o mucha experiencia

en la construcción. El trabajo mostrado a continuación está estructurado de la siguiente forma.

En la primera parte se hace un estudio previo a los antecedentes. En esta se detalla información respecto a las obras de construcción y modelos matemáticos trabajados por algunos autores que buscan solucionar el problema DTCTP. Problema central de la técnica Crashing que hace referencia al balance entre tiempo y costo. Dando por tanto una introducción al tema general del presente trabajo.

La segunda parte consiste en la caracterización del proceso de contratación de obra pública. En la cual se entra en profundidad en el tema de las obras de construcción y las leyes que rigen las obras en Colombia. Mostrando el proceso que tiene que realizar el estado para contratar alguna entidad constructora y también los procesos y requisitos que tienen que cumplir los interesados en llevar a cabo obras de construcción pública.

En la tercera parte se propone la metodología la cual fue basada en un estudio realizado de diferentes modelos matemáticos trabajados por varios autores. Quienes implementan modelos de programación para solucionar el problema de balance entre tiempo y costo para acelerar actividades. Al final se define el modelo matemático asociado que da solución al problema de balance entre tiempo y costo.

Por último, en la cuarta parte se valida la metodología con un caso de estudio. Primero que todo, se buscó un proyecto de construcción dentro del municipio, para lo cual se habló con la secretaria de obras públicas e infraestructura. Entidad que suministro toda la información necesaria como el cronograma de actividades, análisis de costos y recursos empleados. Ya con esto se obtuvieron los parámetros necesarios y se evaluó la funcionalidad de la metodología en casos reales. Al final se muestra que el modelo arroja buenos resultados siendo por tanto aplicable a casos reales de obras de construcción.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los proyectos de construcción son pilares del desarrollo de cualquier país. No solo generan oportunidades de empleo durante su realización, sino que además, en el largo plazo, generan un impacto social y económico en la región donde se realizan.

En el año 2015, la actividad económica de la construcción contribuyó con el 6,7% del PIB del Valle del Cauca, siendo el quinto más importante, superando incluso al sector agropecuario (Cámara de comercio de Cali, 2016). A pesar de la gran importancia de los proyectos de construcción, estos presentan varios problemas a la hora de su ejecución. Uno de los problemas más frecuentes son los desfases.

Colombia enfrenta retrasos en las obras de infraestructura que se están ejecutando con ingresos del Estado. De acuerdo con la plataforma de gestión de infraestructura GPI, de las 94 obras que manejan las agencias gubernamentales de Colombia como ANI, Invías, Cormagdalena y Aerocivil, el 41% de las obras tienen dificultades, lo que las ha obligado a poner término a algunos contratos y a buscar financiamiento para otros (Mccopa, 2019).

Un ejemplo de los desfases es la construcción del parque Bicentenario, el cual es un proyecto concebido durante la alcaldía de Samuel Moreno, en la ciudad de Bogotá. Se pensó en el año 2009, para ser inaugurado en el año 2010, pero a causa de varios factores técnicos la obra se entregó 6 años después de la fecha de entrega (Periódico el tiempo, 2015). Otro caso son las obras de pavimentación a cargo del consorcio vías Popayán, las cuales presentaron retrasos del 72%, ya que en dos años solo se ha avanzado en el 14% del 87% de las actividades del cronograma establecido (Wradio, 2013).

Por otro lado, los desfases en los tiempos de entrega son un problema que también afectan a otros tipos de proyectos como los de desarrollo de software.

En un estudio realizado, se observó que el 29% de los proyectos estudiados fue catalogado como exitoso, mientras que el 19% se declaró como un fracaso y el 52% fue catalogado como discutido (Standish Group, 2015).

Se ha detectado que entre los factores que afectan el normal desarrollo de los proyectos de construcción en Colombia, están: 1) las deficiencias en la recolección de información necesaria para determinar el riesgo de los proyectos y en los estudios de factibilidad, 2) la falta de planeación y 3) las demoras en el cumplimiento de las obligaciones sociales y ambientales propias de cada proyecto (Pérez y Caicedo, 2010). Teniendo en cuenta que los proyectos están expuestos a factores que afectan su culminación, se deben implementar técnicas que faciliten la toma de decisiones en la medida que vayan surgiendo.

Una decisión posible es la reducción de los tiempos de las actividades. La escuela de organización industrial (2014) menciona tres técnicas que ayudan tanto a la planificación como a la ejecución del proyecto cuando se retrasan las tareas y se busca reducir su duración, las cuales son: Fast Tracking, nivelación de recursos y Crashing.

El Crashing consiste en aumentar la cantidad de recursos para disminuir el tiempo de duración de las tareas, donde se analizan las actividades de la ruta crítica con base en el menor costo por unidad de tiempo para identificar las actividades que podrían ser objeto de compresión al menor costo incremental (Escuela de organización industrial, 2014). Con base en esta técnica para la aceleración de proyectos se estudiará y analizará su posible aplicación en la gestión de proyectos de construcción. Para esto se plantea la siguiente pregunta de investigación:

¿Cómo se puede acelerar la ejecución de las actividades en los proyectos de construcción en el municipio?

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GENERAL

Proponer una metodología basada en la técnica Crashing de aceleración de proyectos para disminuir los desfases en el tiempo de ejecución de obras de construcción en un municipio del Valle del Cauca.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar el proceso de contratación y control de los proyectos de construcción.
- Describir los pasos a seguir para la aplicación de la técnica Crashing para la reducción del tiempo de ejecución de las actividades de un proyecto de construcción.
- Validar la propuesta por medio de un caso de estudio en el sector de la construcción.

3. JUSTIFICACIÓN

Todo proyecto puede presentar retrasos en el tiempo de ejecución a la hora de su realización. Para mitigar este problema, varios autores han realizado investigaciones referentes al estudio de aceleración de proyectos, por lo que la literatura es abundante y existe un número significativo de herramientas creadas con tal propósito. Por ejemplo, el CPM o ruta crítica, el cual es frecuentemente utilizado en el desarrollo y control de proyectos y cuyo objetivo principal es determinar la ruta crítica de un proyecto, puede ser empleada junto con el valor agregado o EVM (por sus siglas en ingles) para hallar aquellas actividades críticas que deberían ser gestionadas para reducir el tiempo total de un proyecto, mediante la lectura de indicadores que comparan la realidad del proyecto con lo esperado. Brindando información básica para la toma de decisiones por parte del encargado del proyecto.

Estas herramientas pueden ser empleadas en Colombia con el objetivo de evitar el desfase de los proyectos. Esto es de gran importancia ya que Colombia presenta un grave problema en el área de construcción con respecto a los tiempos de ejecución. La mayoría de las obras no cumplen con sus fechas de entrega, dentro de las cuales la gran mayoría presenta retrasos significativos, lo cual genera sobrecostos e insatisfacción por parte de la sociedad. Es a partir de este problema que se ve la importancia de emplear indicadores de desempeño con el fin de mejorar la gestión de proyectos.

El tema de aceleración de proyectos propone herramientas que ayudan a la planeación estratégica, táctica y operativa dentro de las construcciones, controlando tanto las tareas como los posibles contratiempos que puedan presentarse. Esto es de gran ayuda en municipios como Guadalajara de Buga, la cual presenta un grave problema en el área de construcción en cuanto a retrasos. Ya que una porción importante de las obras no cumple con las fechas pronosticadas debido a diferentes factores dentro de los cuales existen algunos

que pueden ser evitados, como por ejemplo la mala administración del personal o la desorganización.

Por lo que la implementación de técnicas basadas en la aceleración de proyectos apoyará a las obras de construcción puesto que servirá como un método para reducir los tiempos de ejecución de las actividades. Ya sea en la construcción de obras como edificios, casas, carreteras, adecuación de terreno, acabados, pavimentación de huecos en carreteras, etc. Ayudando a las organizaciones que aún no conocen de estas herramientas y metodologías a lograr de forma exitosa y eficiente el cumplimiento de su cronograma. Además, permitirá al sector de construcción desarrollarse, lo que al final conducirá a un mejor aprovechamiento del territorio y una mejora de calidad de vida de la población mediante la construcción de infraestructura de igual o mayor calidad en tiempos más reducidos.

4. MARCO TEÓRICO

El tema central de este trabajo de grado gira entorno a la aceleración de proyectos de la construcción, por lo que es necesario contextualizar algunos temas relevantes a la construcción y gestión de proyectos.

4.1. PROYECTOS DE CONSTRUCCIÓN

Según Burgos y Vela (2015), en Colombia la construcción más que considerarse un trabajo, es un negocio dinámico, incansable y muy compulsivo puesto que, gran parte del tiempo se trabaja a un ritmo constante hasta concluir una construcción y es esencialmente una industria de servicios. Es de servicios debido a que transforma los bienes materiales que generan servicios para la satisfacción de las necesidades de la población en general.

Para la construcción de un proyecto es necesario la colaboración e interrelación de un sin número de entidades, personas y detalles. Entre las cuales se pueden encontrar financiadoras, ingenieros, arquitectos, trabajadores, planos, dinero, etc. Es a partir de la colaboración de todos estos factores que una construcción puede ser realizada. Sin embargo, estos no son las causantes del proyecto sino sus impulsoras. Como cualquier proyecto, las construcciones surgen de una necesidad, problema, oportunidad o idea, las cuales obligan a una entidad o persona a emprender esta tarea.

De acuerdo a la OBS (2016) menciona ocho etapas para la realización de un proyecto de construcción de una obra civil. Las cuales se mencionan a continuación:

- **Identificación de la necesidad:** Se identifica el motivo por el cual se apela a la construcción de una obra de ingeniería civil.
- **Localización:** Se ubica el lugar exacto donde se realizará la construcción.
- **Calculo de inversiones:** Teniendo en cuenta la necesidad y la localización, se lleva a cabo un primer cálculo de la inversión del proyecto. Para reforzar

lo anterior, la dirección pide un presupuesto de todo el proceso y, si es posible, de cada fase.

- **Financiación:** Can base en los cálculos de la etapa anterior se analizan las posibilidades de financiación para dicho proyecto, que pueden variar en función de la naturaleza de este. Los créditos, los préstamos y las subvenciones son los más habituales.
- **Estudios de impacto social/ambiental:** Antes de mover la primera piedra, es preciso medir el impacto que la obra tendrá en el entorno y en la sociedad en general.
- **Documentos añadidos:** Son los trámites o permisos que deben solicitarse antes de la ejecución de la obra.
- **Diseño:** Cumplido lo anterior, el proyecto entra en su fase de diseño, donde se elaborarán los bosquejos, planos, diagramas y cálculos para visualizar la obra en sí misma.
- **Construcción de la obra:** Por último, asignado los recursos y definidos los responsables de cada tarea, la obra está lista para ser ejecutada.

4.1.1. Tipos de obras de construcción

De acuerdo al secretario de obras públicas del municipio de Guadalajara de Buga, Jair del Campo Vásquez, las construcciones se dividen principalmente en dos clases: Edificación y obras civiles.

- **Edificación:** Una edificación es aquella construcción permanente, separada e independiente que es empleada como vivienda colectiva o familiar, o con fines industriales, agrarios o para el desarrollo de alguna actividad. Algunos ejemplos son: colegios, cabañas, silos, etc.
- **Obras civiles:** Se define obras civiles como aquellas construcciones de infraestructura, distinta a una edificación, que se construye con el fin de ser empleada de forma colectiva o pública.

También existe una distinción entre los tipos de obras de construcción dependiendo de la financiación y a su finalidad. Las cuales pueden ser: Obra pública, obra civil y obra privada.

- **Obra pública:** Son aquellas obras que el estado desarrolla y tienen como fin generar un bien para la sociedad. Asimismo, destacan por estar financiadas por fondos públicos como impuestos por lo que no persiguen algún fin de lucro y se enfocan en prestar servicios de utilidad para la nación. Algunos ejemplos de estas son: construcción de puentes, colegios, carreteras, colegios, etc.
- **Obra civil:** Son aquellas que están asociadas al desarrollo de infraestructuras para la población, contribuyendo también a la organización del territorio y aprovechamiento de este. Esta clase de obras son pertinentes a los ciudadanos, por lo que su uso no está limitado. Algunos ejemplos son: calles, autopistas, puertos, parques, puentes, etc.
- **Obra privada:** Son aquellas obras que son promocionadas por una persona u organización no gubernamental, por lo tanto, beneficia a los dueños y no están abiertas al público en general. Algunos ejemplos son: caseta de cobro, instalaciones de una empresa, etc.

La empresa constructora VISE (2016) afirma que existe una línea muy delgada entre una obra pública y una obra civil pues en muchas ocasiones se refieren a lo mismo, de hecho, una obra pública siempre es civil, pero una obra civil no siempre es pública pues existen empresas privadas que realizan obras en pro de la ciudadanía tal es el caso de parques, vialidades y muchas otras construcciones que son realizadas con inversión privada.

4.2. CRASHING

El Project Management Institute (2014) define la técnica de compresión de cronograma, conocida como Crashing, de la siguiente forma:

“Es una técnica utilizada para acortar la duración del cronograma con el menor incremento de costo posible mediante la aportación de recursos. Entre los ejemplos de intensificación se incluyen la aprobación de horas suplementarias, la aportación de recursos adicionales o un pago adicional para acelerar la entrega de las actividades que se encuentran en la ruta crítica. La intensificación

sólo funciona para actividades que se encuentran en el camino o ruta crítica, en las que los recursos adicionales permiten acortar la duración. La intensificación no siempre resulta una alternativa viable y puede ocasionar un incremento del riesgo y/o del costo.”

Dentro de las obras de construcción esta técnica se puede emplear mediante la aplicación de mayores recursos como lo es la contratación de nuevo personal u horas extras para las actividades que presentan retrasos dentro de la ruta crítica.

4.3. ESTADO DEL ARTE

Las técnicas de revisión y evaluación de proyectos son muy útiles a la hora de gestionar una obra ya que permiten realizar un seguimiento continuo del estado real y el estado deseado. Azofeifa (2015), empleo una hoja electrónica (Excel) para encontrar la manera menos costosa de cumplir con la meta de tiempo de terminación del proyecto por medio de la programación lineal. En este artículo se encontró que el método CPM (Critical Path Method) que se manejó, le permite al gerente del proyecto variar los tiempos de duración de algunas actividades de tal forma que se logre el cumplimiento del proyecto dentro de los tiempos estipulados. Además, cuando se tienen tiempos de duración inciertos de las actividades se puede aplicar la técnica de Monte Carlo para obtener resultados más reales. Con este modelo se puede estudiar los beneficios y prejuicios que trae consigo el intercambio de tiempo-costo para un proyecto (Azofeifa, 2015).

Remon (2013) propone el software RPERT (Repetitive-Projects Evaluation and Review Technique) el cual es una herramienta que permite calcular la probabilidad de éxito que tiene un proyecto de finalizar en la fecha esperada. Esta herramienta procesa la información por medio de la integración del método PERT (Program Evaluation and Review Techniques) y la técnica LOB (Line Of Balance). Se diseñó para ser usado en proyectos de construcción con actividades repetitivas y una fecha de culminación definida, por lo que puede ser empleada en la mayoría de construcciones de Colombia y puede suponer una herramienta de apoyo a la hora de calcular el tiempo de culminación.

Ibargüen (2016) realiza una comparación entre diferentes técnicas basadas en la metodología de valor ganado con el fin de soportar la toma de decisiones en el control de proyectos, haciendo énfasis en el valor ganado, la agenda ganada y la duración ganada. En su investigación encontró que todas las propuestas desarrolladas en base al valor ganado permitían una mejora en cuanto a los indicadores y que en su caso estudiado la agenda ganada era la técnica que mejores resultados presentaba. Sin embargo, recalca que sus resultados pueden variar dependiendo del proyecto en el que se empleen dichas técnicas. Por lo que es importante tener en cuenta que existen técnicas que se acoplan mejor dependiendo del caso tratado.

Por su parte, Aguilar y Rangel (2017) adaptaron una metodología no determinística de control de proyectos basada en el valor ganado. Empleada en la construcción de un parqueadero en la ciudad de Santiago de Cali con el objetivo de estudiar y mostrar los resultados que dicha metodología puede proporcionar. Se encontró que el sector de la construcción Colombiana presenta problemas en la planeación y control de obras y que muchos de los escenarios que se proponen son optimista y poco reales. Por lo que es necesario implementar herramientas de gestión de proyectos que incluyan alcance, tiempo y dinero. Lo cual sustenta la necesidad de implementar técnicas de gestión de proyectos, como lo es el Crashing, a las obras de construcción.

JongYul, ChangWook, InKeuk. (2011). Proponen un modelo de programación lineal entera mixta para la solución del problema de tiempo-costos en la ejecución de las actividades de los proyectos considerando el riesgo de no conformidad y el PQLC (potential quality loss cost). A diferencia de modelos anteriores esta propuesta, al tener en cuenta el riesgo de no conformidad, también tiene en cuenta la calidad de las actividades que son intervenidas al aplicar el Crashing. El nivel de riesgo de no conformidad de las actividades permite al gerente tomar medidas preventivas para reducir dicho riesgo, eliminando la necesidad de reprocesar actividades. Permitiendo terminar el proyecto antes de la fecha límite y con un costo directo menor. Este modelo es un modelo válido y práctico con

el cual se minimiza la influencia de PQLC en el costo final del proyecto, con un enfoque que permite aplicarlo y obtener resultados plausibles, optimizando los tiempos y costos de las actividades.

Haouari (2015) investiga el problema estocástico DTCTP (Discrete time/cost trade-off). Este problema multi-modo de programación de proyectos requiere programar una serie de actividades con tiempos estocásticos de tal forma que la suma de los costos de las actividades y el costo esperado de las llegadas tardes se minimice. Para resolver este problema, se propone una estrategia de solución en dos etapas. En la primera etapa, se implementa una estrategia de optimización de simulación que produce un cronograma rentable. En la segunda etapa, se utiliza una formulación de programación de enteros mixtos para derivar un cronograma que sea estable y rentable. Esto quiere decir, que la metodología propuesta es un enfoque híbrido que se basa en la programación de enteros mixtos, la optimización global de una sola variable y la simulación de Monte Carlo. Este modelo junto con la metodología empleada puede servir como base en la propuesta metodológica basada en el Crashing.

Por otro lado, Yang (2011) explora como ampliar el marco de análisis de compensación de tiempo-costo en presencia de incertidumbre mediante la simulación de Monte Carlo, en combinación con un algoritmo multiobjetivo de optimización por enjambre de partículas. El marco STCT (Stochastic Time–Cost Tradeoff) propuesto en el artículo es único en varios aspectos. En primer lugar, trata tres tipos de correlación: la correlación entre la duración de las actividades, los costos de las actividades y la duración y el costo de las actividades individuales. En segundo lugar, esclarece la relación de dominancia estocástica entre las soluciones y también proporciona una regla de oro para facilitar la estrategia de preselección, lo que aumenta la eficiencia computacional profundamente. En tercer lugar, es libre de distribución y no paramétrico, por lo que no restringe el proceso de estimación y la elección de la distribución. Por último, adopta la medida de valor al riesgo para ser el objetivo de optimización.

El resultado del marco propuesto muestra un análisis muy detallado del DTCTP y las variables a tener en cuenta a la hora de solucionarlo.

Ghoddousi, Eshtehardian, Jooybanpour y Javanmardi (2012) estudian el problema de programación multi-modo de proyectos con restricciones de recursos, el problema DTCTP y el problema de nivelación de recursos simultáneamente. Para resolver estos problemas, se emplea el algoritmo genético basado en la no dominación para buscar las soluciones no dominadas considerando el tiempo total del proyecto, el costo y la desviación instantánea de los recursos como tres objetivos. Los resultados del modelo presentados en este documento muestran que al adicionar capacidad de nivelación a los modelos que dan solución al problema multi-modo de compensación discreta de tiempo-costo con recursos compartidos, proporciona soluciones más prácticas en términos de asignación y nivelación de recursos. Lo que hace que esta investigación sea aplicable a la industria de la construcción.

Samer y Mohamed (2015) abordan el problema multimodal de programación de proyectos estocásticos para encontrar una secuencia lógica de actividades. Para lo cual se plantea un problema de tipo DTCTP aplicado a un conjunto de actividades multi-modo donde no se conoce la duración de las actividades ni la duración total del proyecto, pero si se establecen los costos fijos, la fecha de entrega y una función lineal del costo de penalización del proyecto. Para este problema de programación se tiene en cuenta que la duración de las actividades es estocástica y depende de la alternativa de procesamiento. Además de esto, el objetivo consiste en minimizar la suma entre el costo de las actividades y el costo de penalización por no cumplir con la fecha límite. Para esta propuesta se desarrolló un enfoque de dos etapas con las cuales se obtuvo un cronograma estable y rentable el cual funcionaba como una aproximación a la realidad de los proyectos de construcción.

Mohanty, Mishra y Satpathy (2011) presentan un documento con un método simple que puede proporcionar una solución eficiente al problema de selección

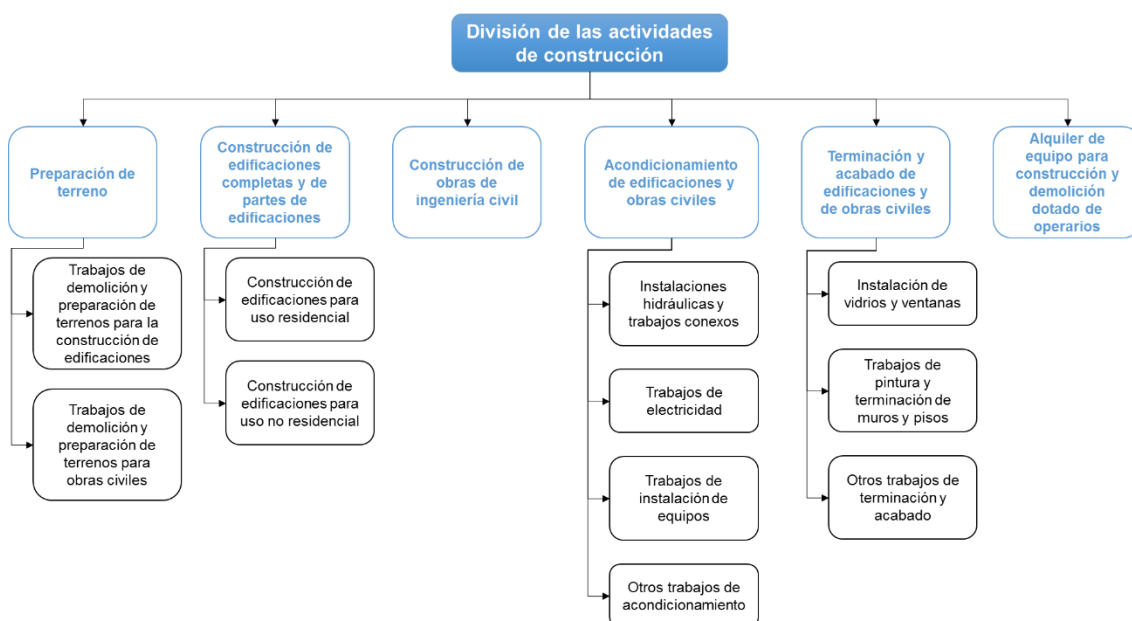
de modo de actividad para la implementación del Crashing dentro de los proyectos. Este método es basado en la simulación heurística y determinística simple. Presenta resultados comparables a las técnicas de optimización sofisticadas, sin embargo, la solución que resulta no necesariamente es una solución óptima como se esperaría. Para validar la efectividad del método se probó con varias redes de proyectos. En cada caso, las soluciones obtenidas resultaron ser soluciones eficientes. Por lo que se concluyó que al aplicar un enfoque más simple puede ser aplicado a proyectos reales que sean conformados por un gran número de actividades. Además, se puede ampliar fácilmente para resolver otros tipos de problemas de compensación de tiempo-costo, cuando se agregan más restricciones o se consideran más factores.

Asrul (2013) también estudia la técnica Crashing. El propone un modelo en base a la programación no lineal entera binaria para seleccionar el mejor método que reduzca la duración de las actividades dentro de la ruta crítica al menor costo posible. Aunque este modelo no tiene en cuenta todos los aspectos que se presentan en los proyectos reales, sirve como una aproximación y puede ser empleada en problemas de selección, tal como muestran en el artículo al estudiar su aplicabilidad mediante un caso de estudio. También se observó que la programación binaria entera se puede utilizar para optimizar el cronograma, el costo y la selección de métodos simultáneamente. El modelo estudiado muestra tomar decisiones al elegir la pendiente de menor costo de actividades críticas para reducir el proyecto de manera óptima. Sin embargo, existen varias necesidades adicionales de investigación para implementar el modelo en la fase de ejecución y monitoreo y control donde se enfrentará la condición aleatoria de incertidumbre.

5. PROCESO DE CONTRATACIÓN Y CONTROL DE LOS PROYECTOS DE CONSTRUCCIÓN EN COLOMBIA

Como se mencionó anteriormente, las obras de construcción en Colombia se dividen en edificaciones y obras civiles. Una de sus diferencias es el resultado final el cual varía dependiendo del tipo de construcción que se realiza, ya sea la construcción de una edificación, vivienda, etc, (en el caso de las edificaciones) y la construcción de puentes, parques, etc, (en el caso de las obras civiles). Esta clasificación divide de forma general el sector de la construcción, sin embargo, no alcanza a mostrar en profundidad todas las actividades que abarca el sector. Por su parte, el DANE clasifica todas las actividades que conforman la construcción en Colombia por medio del CIIU (Clasificación Industrial Internacional Uniforme de todas las actividades económicas). En el cual se puede encontrar, en el capítulo 3 (sección F), la clasificación detallada de las actividades que engloba la construcción. Con el fin de facilitar la apreciación de esta información se procedió a realizar un diagrama que ilustre la información más relevante, como se observa a continuación:

Ilustración 1. División de las actividades de construcción según el CIIU.



Fuente: (Departamento de asuntos Económicos y Sociales, 2009)

Esta división permite observar que la construcción se divide en actividades más específicas que la construcción de una edificación u obras civiles. También abarca trabajos como la preparación de terrenos, la reconstrucción o renovación de construcciones antiguas o en mal estado, los acabados, etc. Estas actividades pueden formar parte de una obra de construcción más grande. Como sería el caso de la construcción desde cero de un edificio, en el cual se tiene en cuenta la adecuación de terreno, la infraestructura y los acabados.

Por otro lado, otra clasificación que se puede hacer en las obras de construcción y que se mencionó anteriormente fue la de obras privadas y públicas. Las obras privadas son realizadas por entidades privadas, es decir, que son independientes del estado como por ejemplo empresas propiedades de inversores privados, no gubernamentales. Por lo que su proceso de contratación y/o contratos no es igual al de las obras publicas.

De acuerdo al secretario de obras públicas del municipio de Guadalajara de Buga, Jair del Campo Vásquez, una de las diferencias más importantes que hay entre las obras publicas y privadas radica en que las entidades privadas deciden los métodos de selección, así como los requisitos necesarios para contratar a su personal, por lo que no existe una guía estandarizada para este proceso. Sin embargo, su proceso se asemeja y en muchos casos toma como guía el proceso de contratación pública.

5.1. MARCO LEGAL DEL PROCESO DE CONTRATACIÓN PÚBLICA

Los proyectos de construcción en Colombia se encuentran normalizados por la ley 80 de 1993, en la cual se establecen los estatutos que rigen la realización de contratos con entidades estatales, la ley 1150 del 2007 la cual introduce algunas modificaciones a la ley 80 del 1993 y por otro lado algunas disposiciones generales con las cuales se reglamentan los contratos financiados con recursos públicos. A continuación se hizo una breve reseña de la normativa principal que rige los procesos de contratación pública en Colombia.

En primer lugar se decretó la **ley 80 de 1983**, por medio de la cual el Congreso de Colombia expide el Estatuto General de Contratación de la Administración Pública. Esta ley tiene como objetivo establecer cuáles son las reglas y principios por medio de los cuales se podrán realizar los contratos entre entidades del estado y personas naturales o jurídicas dentro y fuera del territorio nacional. Se establece que este tipo de contratos de carácter público se realiza únicamente con el objetivo de cumplir los fines de la entidad contratante y debe tener como objeto beneficiar a la población bajo su cargo. Entre sus disposiciones se establece que la modalidad de selección para la adjudicación de dicho contrato será únicamente por licitación pública, también se establecen los deberes y derechos de los contratistas y representantes estatales, entre otras disposiciones.

Después salió la **ley 1150 de 2007**, la cual tiene por objeto introducir modificaciones a la ley 80 de 1993, así como dictar otras disposiciones generales aplicables a toda contratación con recursos públicos. Entre las modificaciones que se le hacen a la ley 80 se establece que para el método de selección la licitación pública será el método utilizado salvo en las excepciones donde aplique la implementación de los métodos de selección abreviada, concurso de méritos o el método de contratación directa. Por otro lado, se ratifica que la selección de la propuesta debe ser un proceso objetivo donde se elija aquella que cumpla con los requisitos establecidos, que sea la que más se adecue con el alcance de los objetivos de la entidad.

Al año siguiente se reglamentó el **decreto 2474 del 2008**. En esta norma se explica cuál es la documentación y requisitos que una entidad pública necesita para presentar un proyecto de pliego de condiciones para la adjudicación de un contrato. También se estipulan los medios por los cuales debe difundirse la información para que esta se encuentre a disposición de todas las personas interesadas.

Dicho pliego de condiciones sirve para guiar a aquellos que presenten propuestas y tengan una base de los requerimientos que deben tener para poder

participar en la convocatoria, además de los plazos que deben cumplir para la presentación de la propuesta y la modalidad por medio de la cual se realizara el proceso de adjudicación. Por último, se describe de forma más detallada las modalidades de selección para la adjudicación de contratos, las cuales son la licitación pública, la selección abreviada, el concurso de méritos y la contratación directa.

Al poco tiempo después se declaró la **ley 1474 de 2011** en la cual se explican los casos en que las personas naturales o jurídicas estarán inhabilitadas para participar en concursos de adjudicación de contratos públicos. Entre estos se encuentran casos como aquellos que hayan apoyado campañas políticas de las personas que se encuentren ejerciendo un cargo político en el mismo nivel administrativo donde se haya generado la convocatoria, ex servidores públicos que no lleven más de 2 años fuera del cargo, familiares o personas cercanas de quien haya presentado una propuesta a dicha convocatoria o de alguno de los dos casos anteriores, quienes por faltas en ejecución de proyectos anteriores queden inhabilitados por la ley. Esto también afecta a las sociedades en las que participen dichas personas inhabilitadas.

Por otro lado, en esta ley se establece que durante la ejecución de los proyectos la entidad estatal contratante deberá asignar o contratar a un supervisor o interventor que se encargue de evaluar el estado de avance del proyecto, el cumplimiento con los estándares de calidad técnicos y con la normatividad que aplique, también están en la obligación de reportar cualquier tipo de situaciones que puedan poner en riesgo la terminación del proyecto. Además, si existe alguna inconsistencia o acto ilegal deben informarlo a la entidad contratante del proyecto.

El **decreto 019 del 2012** salió al año siguiente. En este se habla de todos los organismos y entidades de la administración pública que ejerzan funciones de carácter administrativo y a los particulares cuando realicen funciones administrativas. Busca reformar y eliminar aquellos trámites, procedimientos y

regulaciones que son innecesarios en la administración pública, permitiendo así agilizar y mejorar los procesos administrativos. También estipula varios trámites, procedimientos y regulaciones necesarias y obligatorias de diferentes sectores, dentro de los cuales está el sector de la construcción pública. Describe detalladamente los procesos necesarios para adelantar construcciones públicas, el diseño de los planes territoriales, elimina el diario único de contratación.

También decreta que los contratos estatales solo se publicarán en el Sistema Electrónico de Contratación Pública (SECOP), sistema en el cual las entidades del estado están obligadas a publicar los diferentes procesos de contratación para que cualquier entidad o persona interesada pueda acceder a ella. Adicional a esto, realiza unas reformas a los modos de selección de la contratación pública, entre otros procesos.

Al año siguiente salió la **ley 1510 de 2013**, que tiene por objeto la reglamentación del sistema de compras y contratación pública. En esta se dictan varios objetivos propuestos por la entidad Colombia compra eficiente a cumplir dentro de las obras públicas y se menciona la necesidad de la publicación de los documentos del proceso y los actos administrativos del proceso de contratación en la página del SECOP.

También especifica en detalle los contenidos de los pliegos de condiciones y procedimientos para llevar a cabo las diferentes modalidades de selección, es decir, el contenido de la documentación, la publicación de dichos documentos, el tiempo de validación, excepciones, etc. Por otro lado, habla sobre las garantías en favor de las entidades estatales con ocasión de la prestación de las ofertas, los contratos y su liquidación; y los riesgos a los que se encuentran expuestas las entidades estatales. Por último, se dan algunos incentivos, se habla de los acuerdos comerciales y trato nacional; y se menciona la entidad Colombia compra eficiente como la entidad encargada de velar por el proceso de contratación en Colombia.

Después reglamentaron la **ley 1712 de 2014**, en esta ley se establece que la información relacionada con los proyectos debe estar a disposición de cualquier persona interesada en el cumplimiento de su derecho como persona. Donde tiene derecho a acceder o por lo menos tener conocimiento de la información relacionada con los procesos de contratación, toma de decisiones, adjudicación y ejecución de contratos de obras públicas que se encuentre en posesión de personas obligadas.

Luego salió el **decreto 1082 del 2015**, el cual consiste en la compilación de varias normas relacionadas a las entidades públicas que tiene como objetivo unificar las normativas sobre el sector administrativo de planeación nacional y modificar algunas. Dentro de las normas mencionadas se encuentra la 1510 de 2013, la cual se menciona anteriormente, también la 2326 de 1995, 1467 de 2012, 416 de 2007, 1949 de 2012, 360 de 2011, 2844 de 2010, etc.

Por último, se reglamentó la **ley 1882 de 2018**, esta es una norma aprobada a comienzos del año 2018 la cual modifica algunos artículos de las leyes 80 de 1993, 397 de 1997, 1150 de 2007, 1508 de 2012, 1682 de 2013 y la 1228 de 2008. Es una ley de infraestructura pública que tiene por objeto el fortalecimiento de la contratación pública del país por medio de diferentes disposiciones, como lo son las modificaciones en la licitación pública, las responsabilidades de los asesores, consultores e interventores, el cambio en los pliegos de condiciones, entre otras disposiciones.

5.2. DESARROLLO DEL PROCESO DE CONTRATACIÓN DE OBRA PÚBLICA

Uno de los elementos más relevantes en el desarrollo de un proyecto público es el contrato de obra, que define la ley 80 de 1993 como aquel celebrado por las entidades estatales para la construcción, mantenimiento, instalación y en general para la realización de cualquier otro trabajo material sobre bienes inmuebles. Tiene como objetivo el generar y/o garantizar la prestación de un servicio orientado a la satisfacción de una necesidad colectiva como la construcción de

entidades de salud, educación o carreteras. Con la realización de este tipo de contratos la entidad está en la obligación de garantizar que al llevarse a cabo se estará contribuyendo con el cumplimiento de sus fines velando por el cumplimiento de sus deberes y el respeto de los derechos de las comunidades que acoge (Congreso de la República, 1993).

De acuerdo con la normatividad que rige el proceso de contratación del proyecto de obras públicas en la celebración de un contrato intervienen un acreedor, deudor, un ente regulador y una población que se beneficiara de la realización de dicho proyecto. De entre los participantes, el acreedor será el encargado de seleccionar y contratar a la organización o persona gestora del proyecto. De acuerdo a esto y a la normatividad se definen que:

- **Acreedor:** Es una entidad estatal o de carácter público encargada de desarrollar los objetivos del proceso, los estudios previos y es quien deberá exigir al contratista el cumplimiento de los requerimientos y plazos pactados en el contrato. Para lo cual deberán realizar un seguimiento periódico a las actividades realizadas por el contratista, verificando que este cumpla con las condiciones y requerimientos que sean exigidos por la normatividad vigente o por los que se hayan estipulado dentro del contrato. En caso de no hacerlo esta podrá tomar medidas legales donde le exija al contratista una indemnización por incumplimiento a dichas condiciones.
- **Colombia compra eficiente (entidad de control):** Es una entidad descentralizada de la rama ejecutiva creada en el gobierno de Juan Manuel Santos por medio del decreto ley 4170 de noviembre 3 de 2011. Esta entidad es el rector del sistema de compra pública de Colombia y desarrolla mecanismos de apoyo para los partícipes del sistema de compras y contratación pública (Colombia Compra Eficiente, 2018). Entidad que se encarga de crear y promover políticas con las cuales se busca aumentar la eficiencia en la utilización de los recursos de carácter público, para lo cual debe coordinar con otras entidades que contribuyan en el cumplimiento de sus objetivos llevando acabo los procesos de revisión y control sobre las inversiones que realizan las entidades con dichos recursos.

- **El contratista (deudor):** Puede ser, de acuerdo con la ley, una persona natural o jurídica que está habilitada legalmente para concursar y presente una propuesta que cumpla con los requisitos del pliego de condiciones. En algunos casos se conforman uniones temporales o consorcios con los cuales se busca integrar un conjunto de habilidades y capacidades propias de cada individuo para obtener el contrato y garantizando un producto de alta calidad y durabilidad.

Para la realización de un proyecto de construcción de obra pública, se tiene que el curso mediante el cual se desarrolla el proceso de contratación consta de tres fases:

- **Fase 1:** Planeación.
- **Fase 2:** Selección y evaluación de las propuestas.
- **Fase 3:** Ejecución

Fases que se encuentran reguladas por una serie de normas mencionadas en el marco legal del proceso de contratación de obras públicas, con las cuales se busca dar cumplimiento a los requisitos que exige la ley y por la celebración de un contrato las partes interesadas establecen el objetivo del proyecto y formalizan su vinculación al proyecto.

5.2.1. Fase de planeación en procesos de contratación de obra pública

Esta primera fase comienza con la identificación de una necesidad la cual será la base para la planeación de la obra. Entorno a esta se propondrán unos objetivos y se planteara el esquema de trabajo de aquí en adelante. Entre los resultados de esta primera fase se encuentra los requisitos que deben cumplir los participantes del proceso de selección, las variables a tener en cuenta en la evaluación de las propuestas, como se llevara a cabo el proceso de evaluación y la identificación de los puntos que se tendrán en cuenta en el desarrollo del contrato de adjudicación del proyecto final.

La fase de planeación está constituida por seis puntos importantes los cuales son la planeación, el análisis del sector para obra pública, aspectos a considerar en la estimación de riesgos, pliego de condiciones y minuta del contrato de obra pública, valor y forma de pago de contratos de obra pública, y la experiencia a evaluar en contratos de obra pública (Colombia compra eficiente, 2015). Estos fueron definidos por Colombia compra eficiente y son obligatorios para cualquier obra de construcción de carácter público.

En la elaboración de cualquier obra se parte primero por la planeación del proyecto el cual deberá indicar que el proyecto es viable. Para esto es necesario incluir la necesidad dentro del plan anual de adquisiciones y realizar estudios técnicos como estudios de ingeniería, aspectos presupuestales, establecer el impacto social, económico y ambiental, identificar los permisos, autorizaciones y licencias requeridas para la ejecución del proyecto y proyectar la gestión predial cuyos resultados deberán ser positivos y en favor del proyecto. El proceso de contratación de las entidades estatales solo podrá comenzar cuando los estudios técnicos indiquen que el proyecto es viable.

Una vez hecho esto se pasará al análisis del sector para obra pública. Es necesario que las entidades estatales realicen un análisis detallado del sector antes de realizar el proceso de contratación. Es decir, las entidades deben realizar un estudio del mercado relativo al objeto del proceso de contratación, desde la perspectiva organizacional, técnica, financiera, comercial, legal y de análisis de riesgo. Este estudio debe realizarse con la ayuda de la guía para la elaboración de estudios de sector presentada por Colombia compra eficiente, la cual propone una metodología para su desarrollo.

Además de esta guía, las entidades estatales están en la capacidad de consultar fuentes alternas para apoyar el desarrollo del estudio. Este estudio ayuda a las buenas prácticas y permite a la entidad contratante conocer los indicadores de capacidad financiera y capacidad organizacional de los diferentes proveedores de servicios o bienes relacionados con obra pública, obtener información para

realizar el análisis y administración de los riesgos, y prever el número de proponentes que se presentaran en cada proceso de selección (Colombia Compra Eficiente, 2015).

Con este análisis, se procederá a realizar la estimación de riesgos teniendo en cuenta algunos aspectos a considerar. Según el decreto 1510 de 2013 el riesgo se define como un evento que puede generar efectos adversos y de distinta magnitud en el logro de los objetivos del proceso de contratación o en la ejecución de un contrato (Congreso de la República de Colombia, 2013). Las entidades estatales elaboraran el análisis de riesgo utilizando la metodología propuesta por Colombia compra eficiente en el documento titulado manual para la identificación y cobertura del riesgo en los procesos de contratación, el cual propone administrar los riesgos siguiendo los pasos mostrados a continuación:

- Establecer el contexto en el cual se adelanta el proceso de contratación.
- Identificar y clasificar los riesgos del proceso de contratación.
- Evaluar y calificar los riesgos.
- Asignar y tratar los riesgos.
- Monitorear y revisar la gestión de los riesgos.

También se tendrá que realizar la matriz de riesgo suministrada por Colombia compra eficiente con el fin de ayudar a clasificar detalladamente los posibles riesgos.

Luego de esto se pasará a elaborar el pliego de condiciones y minuta del contrato de obra pública con el formato y metodología dada por Colombia compra eficiente. Se entiende por pliego de condiciones, el conjunto de normas que rigen el proceso de selección y el futuro contrato, en los que se señalan las condiciones objetivas, plazos y procedimientos dentro de los cuales los proponentes deben formular su oferta para participar en el proceso de contratación del contratista y tener la posibilidad de obtener la calidad de adjudicatario del presente proceso de contratación (Colombia Compra Eficiente, 2016).

Por otro lado, se entiende por contrato como el negocio jurídico que se suscribirá entre la entidad estatal y el adjudicatario, por medio del cual se imponen a las partes obligaciones recíprocas y se conceden derechos correlativos que instrumentan la relación contractual que se busca establecer a través del presente Proceso de Contratación (Colombia Compra Eficiente, 2016). Será trabajo de las entidades estatales el adecuar los documentos impartidos por Colombia compra eficiente de acuerdo a sus necesidades y deseos cumpliendo siempre con las condiciones dadas en dichos documentos.

Es importante que en este momento se defina el valor y forma de pago de los contratos de obra pública. De acuerdo a Colombia compra eficiente (2015), las entidades estatales pueden establecer el valor y la forma de pago de los contratos de obra pública a través de diferentes métodos, los cuales se ilustran en la tabla 1:

Tabla 1. Métodos para establecer el valor y la forma de pago de los contratos de obra pública.

MÉTODOS	DE QUE TRATAN
Precio global	El contratista obtiene como remuneración una suma fija y es el único responsable del cumplimiento del objeto, la vinculación de personal, la elaboración de subcontratos o la obtención de materiales.
Llave en mano	El precio corresponde a un valor previamente establecido que opera como remuneración por todas las gestiones que adelanta el contratista.
Precios unitarios	Las partes establecen el costo por unidad de cada uno de los conceptos que integran la obra a ejecutar o ítems de obra.
Administración delegada	La entidad estatal delega la ejecución de la obra en el contratista en calidad de director técnico, quien la ejecuta por cuenta y riesgo de la misma entidad estatal. El contratista obtiene como remuneración los honorarios que se pactan por su gestión.
Reembolso de gastos	En esta modalidad el contratista asume los gastos de ejecución del contrato y la entidad estatal en forma periódica rembolsa dichos gastos y además reconoce al contratista los honorarios que se pactan por su gestión.

Fuente: Adaptado de Colombia compra eficiente

Por último, se tendrá en cuenta la experiencia a evaluar en contratos de obra pública a la hora de realizar una obra pública, la experiencia es un factor relevante dentro de la planeación. Se busca que la experiencia de los proponentes debe ser adecuada y a fin a la obra a realizar. Esto quiere decir que el proponente, con anterioridad, haya participado en obras con actividades parecidas y con un presupuesto relativamente parecido. Es importante remarcar que la experiencia aumenta con el paso del tiempo, por lo que los proponentes al finalizar una obra estarán en condiciones de proponer otras clases de obras.

5.2.2. Fase de selección y evaluación de las propuestas

Una vez terminada la fase de planeación se pasará a la selección y evaluación de las propuestas. Con base en la ley 80 de 1993 y la ley 1150 de 2007 se establece que en los procesos de contratación del sector público, la entidad debe realizar antes de la adjudicación del contrato a una persona natural o jurídica un proceso de selección de acuerdo a lo establecido por la ley. Es importante mencionar que las entidades estatales deberán realizar un proceso de selección de acuerdo a lo establecido por la ley buscando evaluar equitativamente una serie de propuestas, de las cuales se seleccionara aquella que mayor beneficio en materia de costos y tiempo traiga para la organización.

Este proceso de selección puede llevarse a cabo por las modalidades de: licitación pública, selección abreviada, concurso de méritos y contratación directa. A continuación de acuerdo a lo descrito en estas normas y en el decreto 2474 de 2008 se explicará cada uno de estos procesos:

- **Licitación pública:** Este proceso consiste en un concurso abierto donde cualquier persona que este habilitado (que no haya infringido la ley, incumplido en algún contrato anterior o que no tenga un familiar cercano que haya hecho los dos puntos anteriores) puede presentar su propuesta para concursar, esta debe cumplir con los requisitos establecidos para la presentación de propuestas en el pliego de condiciones y presentarse en las fechas establecidas para tal fin. Luego de recibidas las propuestas se

evaluarán y se seleccionará a la persona natural o jurídica a la cual se le adjudicará el contrato.

- **Selección abreviada:** Esta es aplicable en los casos en los que por las características del objeto a contratar las circunstancias de la contratación o la cuantía o destinación de la obra puedan adelantarse un proceso simplificado para garantizar que el proceso de gestión contractual sea lo más eficiente posible.(Congreso de la República de Colombia, 2007). También es aplicable a aquellos proyectos de construcción con licitación abandonada por parte de la entidad contratante, conservando la necesidad de ejecutar la obra. Es un proceso similar a la modalidad de licitaciones públicas donde se establecen unas fechas de presentación de las propuestas, un periodo de evaluación de las propuestas y unas fechas para la adjudicación de los contratos, solo que en este caso el proceso se realiza en un periodo más corto de tiempo.
- **Concurso de méritos:** Corresponde a la modalidad prevista para la selección de consultores o proyectos, en la que se podrán utilizar sistemas de concurso abierto o de precalificación. En este último caso, la conformación de la lista de precalificados se hará mediante convocatoria pública, permitiéndose establecer listas limitadas de oferentes utilizando para el efecto, entre otros, criterios de experiencia, capacidad intelectual y de organización de los proponentes, según sea el caso (Congreso de la República de Colombia, 2007).

En la etapa de planeación del concurso de mérito, la entidad estatal puede hacer una precalificación de los oferentes cuando la complejidad de la consultoría lo considere pertinente. Cabe resaltar que para esto es necesario convocar a los interesados por medio de un aviso público en el SECOP. La entidad estatal debe elaborar un informe de precalificación y publicarlo en el SECOP y deberá efectuar una audiencia pública en la cual conformará la lista de interesados precalificados para participar en el proceso de contratación respectivo. Sin embargo, la conformación de la lista de precalificados no obliga a la entidad estatal a abrir el proceso de contratación.

- **Contratación directa:** La entidad estatal debe señalar en un acto administrativo la justificación para contratar bajo la modalidad de contratación directa, en la normativa se especifica la información que debe contener. Si la cláusula de contratación directa es la urgencia, la entidad estatal no está obligada a elaborar estudios y documentos previos. La modalidad de selección para la contratación entre entidades estatales es la contratación directa.

Para el caso de los proyectos de construcción de acuerdo al decreto 2474 de 2008 solo aplicaran los procesos de licitación pública y selección abreviada, de donde se elegirá al contratista que se encargué de la ejecución de la obra. Proceso donde el representante de la entidad estatal deberá publicar un acto administrativo que dé la orden de apertura al proyecto del pliego de condiciones en el cual se especificara cual es el objetivo de la realización del proyecto, el beneficio que obtendrá la comunidad a cargo de la entidad con la ejecución de la obra, cuáles son las bases de la convocatoria que deberán cumplir las personas o grupos de personas que deseen participar, los roles que ejercerá cada una de las partes durante la ejecución del proyecto, las obligaciones que deben cumplir ante la ley y el cómo se realizará proceso de selección.

Al tener terminada la propuesta del pliego de condiciones la entidad encargada del proyecto y los entes de control proceden a evaluar el documento obtenido con el objetivo de identificar que se debe mejorar antes de publicarse. Cuando ya se corrige el pliego de condiciones se da a conocer dicho acto administrativo especificando información como las fechas de entrega de la propuesta, el proceso de evaluación, selección y elección de la propuesta. Su objetivo es el de dar a conocer el objetivo del proyecto, pero además permite a las personas interesadas poder documentarse y conocer cuáles serán las reglas para poder participar, en caso de tener alguna duda respecto al documento podrá solicitar a la entidad que le aclare dichos puntos por medio de otro documento escrito que será enviado a todos los proponentes, antes de que venza la fecha límite de entrega.

Cada una de los oferentes deberá presentar en la fecha estipulada los documentos relacionados con la propuesta y los que certifiquen su capacidad y experiencia para hacerse cargo de la ejecución del proyecto, además que garanticen el cumplimiento de la normatividad que regule la obra a realizar. Con base en esta información y en los plazos previstos la entidad contratante se encargará de seleccionar las propuestas que continúan con el proceso de selección.

Para el paso siguiente la entidad contratante ha de haber realizado una evaluación técnica de que variables del proyecto se pueden someter a modificaciones y cuáles no. De acuerdo a esto los oferentes pueden mejorar su propuesta hasta la terminación de la fecha límite, en este proceso los participantes tienen la posibilidad de verificar en la plataforma cuál es su estado respecto a la competencia.

La audiencia de adjudicación del contrato debe realizarse en la fecha y hora establecida en el cronograma, audiencia a la que pueden asistir los oferentes y demás personas interesadas. En ella los oferentes tendrán al inicio de la sesión la oportunidad de exponer su punto de vista sobre los resultados de la evaluación de las propuestas, con lo cual solo en los casos en los que sus observaciones presentadas pongan en duda la decisión de los representantes de la entidad contratante se suspenderá la audiencia y se establecerá una nueva fecha mientras se realiza nueva mente el proceso de evaluación de las propuestas.

5.2.3. Fase de ejecución en procesos de contratación de obra pública

Una vez seleccionado el proyecto a realizar se procederá a ejecutar el proceso de ejecución de contratos de obra de construcción. Para este fin, Colombia compra eficiente (2015) define los requisitos necesarios para la fase de ejecución y control del proyecto.

Primero se tienen los requisitos de ejecución de contratos de obra pública. Los cuales son algunos pasos que la entidad estatal deberá cumplir con el objetivo

de iniciar el proceso de ejecución de contratos de obra pública. Estos pasos son (Colombia Compra Eficiente, 2015):

- Efectuar el registro presupuestal.
- Aprobar las garantías del contrato.
- Verificar el pago de las obligaciones del contratista en materia de seguridad social integral y parafiscal.
- Verificar que el interventor o supervisor estén en capacidad de iniciar su gestión.

También se exige que las entidades estatales lleven un control y seguimiento a la ejecución de la obra a realizar por medio de un supervisor o interventor, dependiendo del caso. Ambos están en la tarea de velar por el cumplimiento de las normas técnicas para la elaboración de las obras públicas y de certificar el recibo de satisfacción únicamente al finalizar la obra.

Por otro lado, Según la ley 80 de 1993 las entidades estatales deben pactar en todos los contratos de obra pública las cláusulas excepcionales, las cuales son: interpretación unilateral, modificación unilateral, terminación unilateral y caducidad (Congreso de la República, 1993). Estas deben ser utilizadas con el fin de evitar el paro parcial o total de la obra.

Si más adelante, se ve la necesidad de realizar cambios en los contratos de obra pública es necesario dar una justificación y documentar la modificación correspondiente, bajo responsabilidad del ordenador del gasto. Ya sea para la adición de obras adicionales o complementarias, el plazo del contrato, etc. El único caso en el que no es necesario modificar el contrato es cuando varía la estimación inicial de las cantidades de obra en los contratos de obra pública pactados a precios unitarios.

Para finalizar, existen unas actividades obligatorias a realizar posterior a la liquidación del contrato de obra pública con el fin de llevar un control y

seguimiento al proyecto. Estas actividades, según el decreto 1510 de 2013, son (Congreso de la República de Colombia, 2013):

- Hacer seguimiento a la calidad y estabilidad de la obra y hacer efectivas las garantías que las amparan cuando se presenta un siniestro.
- Cumplir las obligaciones derivadas de la regulación de la disposición final o recuperación ambiental de las obras.
- Cerrar el expediente una vez que se ha cumplido la vigencia de las garantías y las obligaciones derivadas de la disposición final.

En conclusión, los proyectos de construcción requieren de un gran nivel de planeación así como el cumplimiento de varias normas exigidas por el gobierno y diferentes entidades para poder avanzar a la fase de ejecución. Esto se hace con el fin de disminuir los riesgos existentes hasta un nivel aceptable y en el caso de surgir inconvenientes, estos puedan ser manejados. En caso de no controlar los riesgos posibles y existentes, el estado o la entidad responsable de la construcción corre alto riesgo de invertir una gran cantidad de dinero innecesario o de ocasionar peligros a la comunidad y a ellos mismo en la elaboración de la obra.

Entidades como Colombia Compra eficiente son responsables de velar por la correcta ejecución de la contratación y control de las obras de construcción públicas, de igual manera las normas y pliegos que ellos crean y manejan pueden y son empleados por obras de carácter privado, los cuales suelen manejar sus propios sistemas de contratación y construcción.

También, al estudiar la normativa de las obras de construcción se identificó el sistema SECOP, en el cual las entidades del estado publican los diferentes procesos de contratación. Por lo que se puede encontrar documentación tal como los estudios y documentos previos, el aviso de convocatoria, los pliegos de condiciones o la invitación, las adendas, la oferta, el informe de evaluación, el contrato, y cualquier otro documento expedido por la entidad estatal durante el Proceso de Contratación.

Documentación de carácter obligatorio a presentar antes de comenzar con la realización del proyecto y donde se puede encontrar información relevante para el presente trabajo como fecha de iniciación y finalización, actividades que conforman el proyecto, costo estimado del proyecto y la persona a cargo del proyecto. El resto de información necesaria tendrá que ser consultada directamente a la entidad estatal o con el contratista.

6. PROPUESTA METODOLÓGICA PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE LA TÉCNICA CRASHING EN LAS OBRAS DE CONSTRUCCIÓN

Para la aplicación de la técnica Crashing en cualquier proyecto es necesaria la implementación de un modelo de optimización con el cual se pueda encontrar la mejor relación entre el aumento de recursos en las actividades y la disminución de los tiempos de finalización de dichas actividades. Varios autores han desarrollado modelos empleando herramientas como la programación lineal y no lineal, algoritmos genéticos y el algoritmo metaheurístico de la colonia de hormigas para hallar soluciones factibles que presenten buenos resultados en la vida real. En base a los modelos de optimización se desarrolló el siguiente capítulo, en el cual se realizó un análisis de los distintos modelos, para dar solución al problema de intercambio tiempo-costo y se escogió la programación lineal (PL) como la herramienta a emplear. Luego se revisaron diferentes modelos de PL con la finalidad de proponer un modelo matemático y por último se propuso una metodología que permitiera en las obras de construcción la implementación del Crashing.

El tipo de problema que se presenta en los proyectos cuando se busca reducir el tiempo de las actividades con el aumento de recursos, es conocido como el problema de intercambio de tiempo-costo o TCTP (Time-Costo Trade-Off problem). El problema de intercambio de tiempo-costo es un problema que ha sido estudiado por varios autores e influye en las obras de construcción. Su objetivo es encontrar el balance idóneo entre tiempo y costo, teniendo como base que las actividades de un proyecto poseen un costo intrínseco que a su vez tiene una relación directa con el tiempo que dicha actividad dura. Por lo que se puede reducir la duración de algunas actividades con la aplicación de una mayor cantidad de dinero y de forma contraria se puede reducir el costo de una actividad al aumentar el tiempo de duración de dicha actividad.

Esta relación es inversamente proporcional por lo que la adición de una unidad de dinero significará una reducción proporcional de unidad de tiempo. Sin

embargo, algunos autores fueron más lejos y estudiaron la variación de los costos directos e indirectos en la reducción de tiempo de las actividades. Destacan que los costos directos son iguales a la suma de los costos asociados a la mano de obra, alquiler de equipos y materiales de construcción, por lo que al reducir el tiempo de duración de las actividades se aumenta el costo directo. Mientras que los costos indirectos, al estar relacionados a la duración de las actividades, disminuyen al reducir el tiempo de duración de las actividades (Sahu, K y Sahu, M, 2014).

Los costos directos son aquellos costos asociados directamente a la realización de la obra de construcción, los cuales pueden ser costos de la construcción del edificio, adquisición de tierra, nivelación del sitio, control de erosión y sedimentación, pavimento de las calles, bordillos, cunetas y aceras, etc. Diferente a los costos indirectos los cuales no se pueden asociar directamente a la realización de la obra de construcción, pero si para el funcionamiento de la obra, tales como administrativos, comerciales y financieros. De entre estos se encuentran los gastos de administración, dirección técnica, organización, vigilancia, transporte de maquinarias, imprevistos, equipo de construcción, construcción de instalaciones generales, inversión publicitaria, etc (El oficial, 2018).

Al definir los costos directos e indirectos se entiende, de una mejor manera, la afirmación que dan los autores Sahu, K y Sahu, M (2014). Los costos directos, al estar estrechamente relacionados con las operaciones de la obra, tienden a subir cuando se invierten más recursos directos como lo es la mano de obra. Cosa que no ocurre con los costos indirectos, ya que estos tienen una mayor relación con la duración de las actividades, por lo que tienden a reducirse con una mayor inversión en los recursos directos. Sin embargo, cabe resaltar que el ahorro producido por los costos indirectos, en la mayoría de los casos, no supera al aumento de los costos directos, razón por la cual se espera que la implementación de la técnica Crashing genere costos adicionales a las obras de construcción.

Varios autores han trabajado el problema TCTP y han desarrollado diferentes modelos que le dan solución. Por ejemplo; Diaby, Cruz y Nsakanda (2011) formularon un modelo de programación no lineal del problema TCTP y desarrollaron una aproximación de programación geométrica convexa, que luego evaluaron en un caso hipotético. El modelo arrojó resultados favorables y realistas, haciendo de éste una herramienta adecuada para implementar en casos reales. A pesar de esto, los autores afirman que el modelo presenta algunas limitantes dentro de las cuales se destacan dos como principales. La primera es que el modelo no tiene en cuenta mejoras de calidad y la segunda que no puede manejar funciones de costo de Crashing discontinuo o alternativas discretas para realizar el Crashing de una tarea dada directamente. Factores que pueden afectar futuros resultados.

Por otro lado, Aghaie y Mokhtari (2009) realizaron una aproximación diferente. Ellos diseñaron un modelo basado en el algoritmo metaheurístico de la colonia de hormigas y la técnica de simulación Monte Carlo, para el problema de implementación de Crashing en los proyectos bajo incertidumbre. Para su evaluación, los autores optaron por un ejemplo ilustrativo que se acomodara a sus necesidades. El modelo desarrollado tuvo beneficios para la administración de riesgos de los proyectos permitiendo seleccionar opciones adecuadas para disminuir las fechas de terminación. Se destaca que es una herramienta adecuada para la planeación y programación de proyectos del tipo PERT. Sin embargo, es necesaria la comparación de los resultados con otras soluciones factibles para garantizar la eficiencia del modelo, ya que en ocasiones los resultados obtenidos no siempre son reales o los más óptimos.

Otro método es el propuesto por Afruzi, Roghanian, Najafi y Mazinani (2012). Ellos emplearon el algoritmo genético de dominancia difusa ajustado para solucionar el modelo propuesto procurando minimizar el tiempo total del proyecto y los costos del mismo. Después de haber planteado el modelo matemático lo evaluaron al aplicar el modelo en diferentes casos de proyectos de distintos tamaños. El resultado demostró que el modelo fue efectivo en todos los casos

logrando el objetivo de disminuir los tiempos y costos. Sin embargo, como mejora los autores proponen tener en cuenta la calidad de las actividades ya que puede no ser la adecuada al reducir los tiempos de las actividades.

Los modelos mencionados anteriormente son modelos efectivos que dan solución al problema TCTP. Sin embargo también son modelos complejos que requieren experiencia y conocimiento en optimización además de un software especializado para su utilización. Por otro lado, algunos autores han desarrollado modelos basados en la programación lineal que también dan soluciones efectivas al problema en cuestión.

Mohammad, Baktiar, Shuddasatwa y Tasnima (2004), basan su trabajo en la afirmación de que los proyectos han ido aumentando su grado de complejidad con el paso de los años, lo cual ha aumentado la dificultad de alcanzar la fecha de entrega programada inicialmente. Los recursos económicos y el tiempo son limitados, lo cual genera un problema donde se busca encontrar el punto de equilibrio entre reducción de tiempo y aumento de costos. Esto hace que los gerentes necesiten de herramientas sistematizadas y efectivas que permitan optimizar la ejecución del proyecto.

Necesidad que los autores buscan suplir por medio de una propuesta metodológica aplicable a aquellos casos en los que se presente la necesidad de terminar el proyecto en un periodo de tiempo inferior al inicialmente planteado. Para encontrar dicho punto presentan un modelo matemático basado en la programación lineal cuya función objetivo busca reducir el tiempo total de completar el proyecto en la fecha especificada al mínimo costo posible, por ende, el modelo únicamente reduce la duración de aquellas actividades que resulten ser críticas empleando de manera eficiente los recursos.

Según un trabajo del autor Elmabrouk (2012), se afirma que para calcular el costo total de terminación de un proyecto en la fecha esperada y utilizando la técnica Crashing pueden usarse diferentes métodos. Estos requieren el uso de

programas especiales que ayuden a calcular el costo del proyecto. Dentro de los métodos mencionados, destacan los modelos de programación lineal los cuales permiten la programación de modelos robustos que usan una mayor cantidad de variables y requieren de un tiempo de computación menor.

Por otro lado, los autores Karmaker y Halder (2017) plantean que, si bien los encargados de la administración de un proyecto deben gestionar adecuadamente los recursos para desarrollarlo dentro de las especificaciones planteadas por los compradores, se hace muy difícil solucionar todas las posibles complicaciones que puedan presentarse, ya que hay diversas variables externas e internas cuyo comportamiento es incierto y pueden llegar a causar retrasos en la ejecución del proyecto. Así mismo, se puede dar el caso de que los compradores pidan a los encargados entregar la obra en una fecha inferior a la pactada. Cualquiera fuera el caso, conlleva a una reprogramación de las actividades del proyecto, lo cual, según lo que plantean los autores, puede hacerse por medio de la implementación de un modelo de programación lineal que busque minimizar los costos adicionales que se incurren al reducir la duración de las actividades del proyecto para así alcanzar la fecha deseada de terminación del mismo.

Khalaf, Bakar, Leong y Lee (2010), proponen una metodología para hallar la duración de tiempo mínima de un proyecto mediante la aplicación de la técnica Crashing a todas las actividades que lo conforman. Esto genera un aumento considerable en los costos de realización ya que se incrementan los costos asociados a la ejecución de cada una de las actividades. Con el fin de evitar que los costos sobrepasen el presupuesto inicial y además se genere un ahorro significativo en el proyecto, los autores proponen un modelo de programación lineal que busca extender la duración de las actividades no críticas, sin convertir estas en actividades críticas y hasta el punto en el que se maximice el ahorro de los costos del proyecto manteniendo la duración mínima invariable.

La programación lineal es una opción posible para la solución del problema TCTP. De acuerdo a Hernandez y Bluhm (2016) como herramienta de optimización posee las siguientes ventajas:

- Permite comparar un gran número de soluciones y alternativas en relativamente poco tiempo.
- Indica a los tomadores de decisiones, como emplear eficazmente sus componentes en la búsqueda de optimizar recursos.
- Permite una toma de decisiones objetiva.
- Reconoce “los cuellos de botella” y momento para corregirlos.

Tras realizar la revisión anterior, se decidió que el presente trabajo basaría la metodología propuesta en un modelo de programación lineal que logre minimizar el costo de la aplicación de la técnica Crashing en obras de construcción.

6.1. PROGRAMACIÓN LINEAL

La toma de decisiones es inherente a la mayoría de los aspectos de las finanzas, la economía, la empresa, la industria y las actividades sociales y políticas. En la actualidad, los procesos de decisión basados en modelos son esenciales como buena práctica de la gestión y organización de las empresas. Una de las herramientas que actualmente proporciona decisiones más fiables es la Optimización, campo en el que confluyen las Matemáticas y las Ciencias de la Computación. El propósito de esta es construir y resolver de forma efectiva modelos realistas de la situación que se estudia, con objeto de permitir que los tomadores de decisiones exploren una amplia variedad de posibles alternativas (Maestre, 2014).

Se conoce como programación lineal a la técnica matemática que permite la optimización de una función objetivo a través de la aplicación de diversas restricciones a sus variables. Se trata de un modelo compuesto por una función objetivo y sus restricciones, constituyéndose todos estos componentes como funciones lineales en las variables en cuestión. Esto hace que, a través de su método, se puedan simplificar los cálculos y obtener un resultado próximo a la

realidad (Vasquez, 2015). Es por tanto que la programación lineal busca obtener el máximo rendimiento posible en una situación dada.

Cuando se hace referencia a rendimiento, se está hablando de la optimización del sistema que puede ser de dos formas:

- Maximización: Cuando lo que se persigue es el máximo de utilidad o ingreso.
- Minimización: Cuando se persigue un mínimo de costos o egresos de una empresa.

La programación lineal es una de las técnicas más útiles de la investigación de operaciones en una amplia gama de problemas empresariales, tales como: económicos, industriales, financieros, productivos, hospitalarios, etc. (Salas, 2017). A continuación se presentan algunos elementos básicos de la programación lineal.

6.1.1. Problema de programación lineal

Un problema de programación lineal posee una función objetivo, n variables y m restricciones. Este tiene la siguiente forma (García y Ortega, 2012):

- Función objetivo:
$$Z = Cx$$
- Sujeto a (Restricciones):
$$Ax = b$$

$$x \geq 0$$

Dónde: A es la matriz de coeficientes técnicos;

- Matriz $m \times n$
- m filas – restricciones
- n columnas – variables

b es el vector de disponibilidad de recursos;

- Matriz $m \times 1$
- Tantos elementos como restricciones

C es el vector de contribuciones unitarias al beneficio;

- Matriz $1 \times n$

- Tantos elementos como variables

Solución del problema x

- Matriz $n \times 1$

6.1.2. Relación entre m y n

Puede haber tres casos para la relación entre m y n (García y Ortega, 2012):

1. $m > n$, típicamente, solución no factible. (O el modelo está mal o no existe solución factible).
2. $m = n$, típicamente, solución factible única. Sistema compatible determinado. Existe una única solución, con lo que hay un problema de decisión.
3. $n < m$, típicamente, infinitas soluciones factibles. Sistema compatible indeterminado. Infinitas soluciones, el problema consiste en obtener la mejor.

6.1.3. Caracterización de soluciones

Los problemas de programación lineal que tienen soluciones presentan diferentes tipos de soluciones. Estas pueden ser: Factible, linealmente independiente, linealmente dependiente o linealmente independiente. Las soluciones mencionadas anteriormente poseen características específicas que las diferencian de las otras y se pueden observar en la tabla 2:

Tabla 2. Caracterización de soluciones de los problemas de programación lineal.

Tipos de solución	Caracterización
Solución	Un conjunto de valores x es una solución del problema si cumple el sistema de ecuaciones $Ax = b$
Solución factible	Un conjunto de valores x es una solución factible del problema si cumple el sistema de ecuaciones $Ax = b$ (es solución) y cumple que $x \geq 0$, es decir todo los valores son no negativos.
Solución linealmente independiente	Una solución x es linealmente independiente si las columnas de la matriz A correspondientes a las variables con valor no nulo son linealmente independientes.
Solución linealmente dependiente	Una solución x es linealmente dependiente si las columnas de la matriz A correspondientes a las variables con valor no nulo son linealmente dependientes.
Características de las soluciones linealmente independientes	Dado que en un problema de programación lineal $n > m$, si el rango de la matriz A es m: • El número máximo de componentes no nulas de una solución linealmente independiente es, m y • El número mínimo de componentes no nulas de una solución linealmente dependiente típicamente es $m+1$

Fuente: García, A. Ortega, M. (2012). Programación lineal.

6.2. MODELO ESTUDIADO PARA EL DESARROLLO DE LA PROPUESTA METODOLÓGICA

Entre los modelos de programación lineal encontrados en la literatura para darle solución al problema de intercambio entre tiempo y costo en los proyectos de construcción se destaca el modelo de minimización de costos de Mohammad, Baktiar, Shuddasatwa y Tasnima, el cual se usó como base para la propuesta metodológica.

En el artículo trabajaron el problema TCTP para balancear la reducción de tiempo de entrega del proyecto con el aumento de los costos. Esto mediante la implementación de un modelo de programación lineal, el cual redujo la duración de las actividades críticas por medio de la técnica Crashing y a la vez minimizó el costo que dicha técnica generaría.

Los autores plantearon un modelo que acelera el tiempo de ejecución de las actividades críticas, siendo estas las más largas y por ende las que definen el tiempo de finalización. Al reducir los tiempos de estas actividades se corre el riesgo de que las actividades críticas dejen de serlas y que un nuevo camino crítico se forme. Sin embargo, el modelo posee restricciones que evitan este caso. Por lo que se reducen sólo las actividades críticas hasta cierto punto y siempre las de menor costo, garantizando así que se reduzca el tiempo de finalización con el menor costo posible. Una vez reducidas lo suficiente, el modelo arroja el tiempo que cada actividad debe durar y el costo total.

En base a lo planteado por los autores se propuso el siguiente modelo matemático, el cual da solución al problema TCTP dentro de los proyectos de construcción:

Variables: Las variables empleadas para el modelo de minimización son las siguientes:

- M_j : Representa el momento en el que ocurre un evento j (siendo $j = 1, 2, 3, \dots, m$) medido desde el principio de la obra. Es decir, la variable M_j representa el momento en el que una actividad inicia y/o termina, pudiendo unir dos o más actividades. Según la ilustración 2, esta variable representa los nodos numerados.
- X_i : Representa la cantidad de tiempo (sean horas, días, semanas, etc.) que se reduce la actividad i (siendo $i = 1, 2, 3, \dots, n$).

Parámetros: Se identificaron los valores fijos dentro del modelo que definen los rasgos del proyecto. Estos son:

- **Pendiente del costo:** Relaciona las actividades con la variación del costo y tiempo que tendrá el aplicar la técnica Crashing. Entre menor sea su valor indicara que la actividad es más viable para aplicar el Crashing y por ende una mejor opción en comparación a otras actividades. Este parámetro se halló con la siguiente fórmula:

$$(Pendiente\ del\ costo, C_{ri}) = \frac{Costo\ Crashing\ de\ i - Costo\ normal\ de\ i}{Tiempo\ normal\ de\ i - Tiempo\ Crashing\ de\ i}$$

Ecuación 1. *Calculo de la pendiente del costo.*

- **Límite máximo:** Se establece un límite máximo para los valores que puede tomar la variable X_i , debido a que no es posible una reducción infinita de los tiempos. Este parámetro es representado como Z_i
- **Duración de las actividades:** La duración de cada una de las actividades se obtendrá de las especificaciones del proyecto y se juntaran en el parámetro D_i .
- **Duración ideal:** La duración ideal es un valor subjetivo que varía de proyecto en proyecto. Idealmente será dado por los administradores del proyecto, quienes evaluarán las condiciones y sugerirán una fecha optima y realista.

Función objetivo: Se establece como función objetivo la minimización de la sumatoria de la pendiente del costo de cada una de las actividades i multiplicado por la cantidad de tiempo que se reduce la actividad i . Esta minimización permite escoger las actividades críticas que no solo reducen el tiempo al deseado sino también lo hacen al menor costo posible.

$$Min\ Z = \sum_{i=1}^n (C_{ri} \times X_i)$$

Ecuación 2. *Función objetivo del modelo matemático de minimización de costos para la aplicación del Crashing las ecuaciones arrancaron antes*

Restricciones: Estas limitan los posibles valores que las variables pueden tomar. Relacionando los parámetro con las variables a través de un conjunto de ecuaciones lógicas.

- **Reducción máxima de tiempo en las actividades:** De acuerdo a la información específica del proyecto se calcula el tiempo máximo que se puede reducir la duración de las actividades (Z_i). El valor calculado de Z_i será

el valor máximo que tomara la variable X_i para cada actividad i y se representa usando la ecuación 9.

$$X_i \leq Z_i ; \forall i$$

Ecuación 3. Restricción de reducción máxima de tiempo en las actividades.

- **Momento en el que ocurre el evento inicial:** M_1 representa el momento en el que ocurre el evento inicial de proyecto por lo que tomara el valor de cero como se muestra en la ecuación 10.

$$M_1 = 0$$

Ecuación 4. Restricción de momento en el que ocurre el evento inicial.

- **Momento en el que ocurre un evento:** Para todo evento diferentes de $j=1$ hay un evento predecesor con su respectiva actividad asociada, donde la duración de la actividad i debe ser menor o igual al momento en el que ocurre el evento j menos el momento en el que ocurre el evento anterior a j más el tiempo en el que se reducirá la actividad i , como se muestra en la ecuación 11.

$$M_j - M_{\text{predecesora de } j} + X_i \geq D_i, \text{ para } i = 2, 3, \dots, n \text{ y } j = 1, 2, 3, \dots, m$$

Ecuación 5. Restricción de momento en el que ocurre un evento.

- **Duración del proyecto:** La duración ideal del proyecto se representa con la letra F y es mayor o igual al momento en el que ocurre el evento final m .

$$M_m \leq F$$

Ecuación 6. Restricción de duración del proyecto.

- **Restricciones de no negatividad:** Todas las variables del proyecto deben ser mayores o iguales a cero, por lo cual se plantean las ecuaciones 7 y 8 para evitar que tomen valores negativos.

$$M_j \geq 0 ; \forall j$$

Ecuación 7. Restricción de no negatividad para el momento en el que ocurren los eventos j .

$$X_i \geq 0 ; \forall i$$

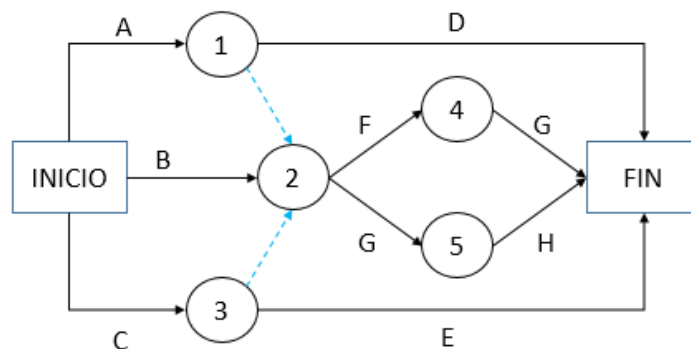
Ecuación 8. Restricción de no negatividad para la cantidad de tiempo que se reduce la actividad i .

6.3. DIAGRAMA DE FLECHAS

Es importante mencionar que para el diseño del modelo de programación lineal es necesario la implementación del método de diagramación de flechas, también conocido como Actividad en la Flecha (AOA) para la formulación de las restricciones de momento.

El AOA es un método para crear un diagrama de red del cronograma del proyecto que utiliza flechas para representar las actividades, que se conectan en nodos para mostrar sus dependencias. Este método sólo utiliza dependencia final a inicio y puede requerir el uso de relaciones “ficticias”, denominadas actividades ficticias, que se representan como una línea de puntos, para definir correctamente todas las relaciones lógicas. Como las actividades ficticias no son actividades del cronograma reales (no tienen contenido de trabajo), se les asigna un valor de duración cero a los fines del análisis de la red del cronograma (Olalde, 2012). La ilustración 2 muestra un diagrama de lógica de la red simple dibujado utilizando el ADM, donde los nodos representan eventos, las letras y líneas actividades y las líneas azules representan las actividades ficticias.

Ilustración 2. Ejemplo de diagrama de red dibujado utilizando el ADM.



Fuente: Elaboración propia.

6.4. PROPUESTA METODOLÓGICA

Para la propuesta metodológica se estudiaron diferentes modelos empleados por los autores que buscaban dar solución al problema TCTP. De entre los cuales se destacó el modelo presentado anteriormente y fue la base principal para el modelo que se propuso. A continuación se muestran los pasos para la implementación de la técnica Crashing en obras de construcción:

1. **Recolectar información base del proyecto:** El primer paso de la metodología consiste en recolectar información correspondiente al proyecto al cual se va a aplicar. Esta información consiste en: Contrato de obra, estudios previos, cronograma de actividades, análisis de precios unitarios, cantidades de obra, análisis de recursos involucrados y precedencia de actividades
2. **Diseñar la red del proyecto de acuerdo a su relación de precedencia:** En el segundo paso se analizará la duración de las actividades y su precedencia, para posteriormente dibujar el diagrama de red del proyecto con el fin de ilustrar de mejor manera la estructura del proyecto.
3. **Determinar la ruta crítica y clasificar las actividades en críticas y no críticas:** Con ayuda del diagrama de red se calculará la holgura de todas las actividades. Para esto se tendrá en cuenta los siguientes conceptos:
 - **Primer inicio:** Es la fecha más cercana en que una actividad determinada puede comenzar; se calcula con base en la fecha de inicio probable del proyecto y las duraciones estimadas de las actividades precedentes.
 - **Primer final:** Es la fecha más cercana en que una actividad puede completarse; se calcula al sumar la duración estimada de la actividad a su primera fecha de inicio.
 - **Ultimo inicio:** Es la última fecha en la cual una actividad en particular debe iniciarse con el fin de que todo el proyecto se termine en su fecha de terminación requerida. Se calcula al restar la duración estimada de la actividad de la última fecha de su terminación.

- **Ultimo final:** Es la última fecha en la cual una actividad en particular debe completarse para que todo el proyecto concluya en su fecha de terminación requerida. Se calcula con base en la fecha de terminación requerida del proyecto y la duración estimada de cada actividad subsiguiente.

Para calcular la holgura se debe restar el valor del último inicio y el primer inicio de cada actividad. Luego, teniendo en cuenta que una holgura igual a cero equivale a una actividad crítica, se clasificarán las actividades del proyecto como críticas y no críticas.

4. **Recolectar los datos de aceleración de actividades tales como costo Crashing y tiempo máximo que una actividad puede reducirse:** El primer paso en este punto consiste en determinar la duración Crashing y costo Crashing de las actividades críticas del proyecto. Una vez recolectada la información se realizará un análisis de las posibles nuevas rutas críticas que puedan surgir. Este análisis consiste en verificar las demás rutas del proyecto, destacando aquellas que más se acercan a la duración crítica. Para, posteriormente, estudiar en qué casos estas pasan a ser rutas críticas. En caso tal de que se pueda presentar una nueva ruta crítica con los tiempos Crashing obtenidos, se modificara el límite de reducción, aumentando la duración Crashing, con el fin de evitar esto.
5. **Calcular la pendiente del costo sobre el tiempo para cada una de las actividades del proyecto:** En este paso se aplicara la ecuación 7 teniendo en cuenta todas las actividades del proyecto y su duración normal, duración Crashing, costo normal y costo Crashing.
6. **Formular el modelo matemático:** Esto quiere decir que se formularán las ecuaciones, parámetros, variables, funciones objetivo y restricciones dentro del programa utilizando las ecuaciones 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 y 8.
7. **Correr el modelo e identificar los costos obtenidos:** Con el modelo formulado se pasará a correrlo y obtener las actividades a acelerar, el tiempo de aceleración y el costo que cada una representa. Para después calcular el costo total del proyecto en el que se incurre para cumplir con la fecha ideal planteada.

8. Analizar los resultados obtenidos y compararlos con los datos iniciales:

Por último, con los datos obtenidos se compararan con el costo inicial y se realizará un análisis para determinar si es rentable la aceleración del proyecto.

En general, se observa que la propuesta metodológica es de interés para las partes interesadas, en especial para el acreedor y el contratista. El contratista será el responsable de implementar la metodología debido a que es el responsable de dirigir las actividades del proyecto de construcción. Cabe resaltar que la propuesta metodológica es principalmente una herramienta correctiva ya que busca acelerar proyectos que estén presentando desfases en su elaboración. Sin embargo, también es aplicable antes de comenzar las construcciones y puede brindar un mayor orden y control a la gestión de los proyectos.

7. EVALUACIÓN DE LA PROPUESTA METODOLÓGICA

Una vez propuesta la metodología para la aceleración de proyectos es necesario evaluar su impacto y utilidad en casos reales. Esto con el fin de detallar el alcance y posibles beneficios que esta puede aportar a proyectos de construcción, además determinar su aplicabilidad en el sector y posibles mejoras. Para llevar a cabo este punto se escogió el proyecto ya ejecutado “Construcción de muro en Gaviones, Box Culvert y Obras Complementarias en la vía Zapata Monterrey zona rural del municipio de Guadalajara de Buga –Valle” como caso de estudio.

7.1. INTRODUCCIÓN AL CASO DE ESTUDIO

La vía Zapata – Monterrey se encontraba en mal estado como se puede observar en la ilustración 3. De acuerdo a un estudio realizado por la Secretaria de Obras Públicas, se estimaba que en promedio en 20 metros lineales se encontraban erosiones causadas por las lluvias, las cuales generaban un alto riesgo para los vehículos que transitan esta vía. Después de la visita realizada por funcionarios de la secretaria de Obras Públicas, se evidenció la necesidad de realizar la construcción de un muro en Gaviones, para proteger la banca de la vía, un Box Culvert, y la canalización de una margen de la vía. Y así poder recuperar sus condiciones viales y mantener el flujo de vehicular en toda época y brindar seguridad al tránsito vehicular (secretaria de obras públicas e infraestructura, 2018).

Ilustración 3. Estado inicial de la vía la Zapata - Moneterrey.



Fuente: Estudios previos.

Para materializar la solución expuesta, la Secretaría de Obras Públicas e Infraestructura elaboró el proyecto “Construcción de muro en Gaviones, Box Culvert y Obras Complementarias en la vía Zapata Monterrey zona rural del municipio de Guadalajara de Buga –Valle” con el cual se pretende cumplir una de las metas del programa 224 Infraestructura vial rural Subprograma 2242 “Construcción, mejoramiento y adecuación de vías rurales con obras de arte, Box Culvert, puentes, muros de contención” del Plan de Desarrollo Municipal 2016-2019 “Buga Renovada” (Secretaria de obras públicas e infraestructura, 2018).

La construcción de los muros de Gaviones constituye una parte del proyecto de obra pública. Estos están constituidos por la superposición de cajas de forma prismática rectangular, construidas con una malla metálica de celdas hexagonales y rellenas con rocas de pequeño tamaño. Estos muros son estructuras de gran resistencia y flexibilidad que se adaptan bien a los asientos diferenciales y movimientos del terreno sin perder su eficacia ni fracturarse. Estas estructuras, además, se integran fácilmente en el paisaje ya que permiten el desarrollo de vegetación en los huecos rellenos de tierra, reduciendo así su impacto medioambiental. La función principal de estos muros es la de soportar el empuje activo del terreno, ya que su flexibilidad permite que se den las deformaciones necesarias para esta condición (Ingeniero de caminos, 2018).

Por otro lado, está la construcción del Box Culvert. Los Box-Culvert son estructuras autoportantes enterradas, de sección rectangular hueca, y que pueden estar compuestas por piezas monolíticas, o por dos piezas superpuestas. Su sencillo sistema de encaje de unas piezas con otras permite ejecutar con rapidez pasos para animales, pasos inferiores peatonales, canalizaciones hidráulicas, galerías técnicas (electricidad, agua, gas, telecomunicaciones, etc.) y colectores de drenaje (Farcimar, 2019).

Por último se encuentran las obras complementarias. Las cuales hacen referencia a cualquier obra que no esté contemplada en las obligaciones del proyecto pero que sea necesario para realizarlo. Por lo que se pueden encontrar

actividades como limpieza, acarreo de materiales, construcción de campamentos, etc.

Para la elaboración de este proyecto, la alcaldía de Buga lanzó el pliego de condiciones en el mes de junio de 2018, en el cual se estableció que la adjudicación del proyecto se realizara por medio del proceso de Selección abreviada de menor cuantía. Como resultado del proceso de selección, el 13 de julio del 2018 se le adjudicó a la arquitecta Ana María Campo Cruz la ejecución del proyecto.

Bajo la supervisión de la arquitecta, la obra fue estructurada en tres etapas: 1) Muro de contención en Gaviones, 2) Cuneta en concreto y sistema sub-drenaje y 3) Construcción Box Coulvert. En general, el proyecto tuvo una duración total de 51 días, iniciando el 31 de Julio del 2018 y terminando el 14 de septiembre del 2018. Su costo total fue de \$81.338.865 de pesos. Por su valor y duración este es un proyecto pequeño en comparación con obras como puentes, parques, edificaciones, etc.

El proyecto de obra pública de la ciudad de Guadalajara de Buga como tal ya culminó y fue entregado en septiembre del 2018. Por lo que el ejercicio mostrado en este trabajo fue un caso hipotético en el que se estudiaron los beneficios de aplicar la técnica Crashing al inicio de la obra. Cabe resaltar que toda obra pública tiene que presentar información tal como cronograma de actividades, análisis de precio unitario, relación de precedencia entre actividades y análisis de rendimiento de mano obra y equipo. Por lo que se puede aplicar la metodología antes de iniciar cualquier proyecto de construcción.

7.2. IMPLEMENTACIÓN DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA

- **Recolectar información base del proyecto.**

Siguiendo con los pasos de la metodología, se comenzó con la obtención de la información respecto al proyecto. Para esto se utilizaron dos fuentes; la primera fue la página del SECOP donde aparece el estudio previo y el contrato de obra.

La segunda fuente fue el ingeniero de obras públicas e infraestructura Jair del Campo Vasquez, quien suministró el análisis de costos, duración y precedencia de las actividades y el cuadro de rendimiento de la obra. Con toda la información a mano se procedió a analizarla y crear las tablas que se muestran a continuación, las cuales resumen los datos más importantes a tener en cuenta para la metodología propuesta.

Tabla 3. Costos Unitarios y Totales del proyecto.

N°	DESCRIPCION DE LA ACTIVIDAD	UNIDADES	CANTIDAD	COSTO UNITARIO	COSTO TOTAL
1	MURO DE CONTENCION EN GAVIONES				\$ 33.915.039
1.1	CAMPAMENTO TABLA 18 M2	UND.	1	\$ 1.854.793,000	\$ 1.854.793
1.2	LOCALIZACION-REPLANTEO OBRA ARQUITECTON	M2	61	\$ 3.268,240	\$ 199.363
1.3	RELLENO ROCAMUERTA COMPACT-RANA+ACARREO	M3	121	\$ 31.866,240	\$ 3.855.816
1.4	EXCAVACION EN ROCA	M3	121	\$ 58.862,545	\$ 7.122.368
1.5	SOLADO ESPESOR E=0.05M 3000 PSI 210 MPA	M2	16	\$ 17.945,000	\$ 287.120
1.6	ZARPAS EN CONCRETO DE 3000 PSI.	M3	8	\$ 437.632,000	\$ 3.501.056
1.7	CONTRAPISO REFORZADO E=10CM 3.000Psi	M2	12	\$ 39.306,000	\$ 471.672
1.8	GAVIONES CALIBRE 12	M3	96	\$ 138.943,000	\$ 13.338.528
1.9	ACARREO MATERIAL PETREO.VOL.COMPACT	M3K	533	\$ 1.549,667	\$ 825.973
1.10	PLANTA ELECTRICA 4000 RPM	DIA	45	\$ 54.630,000	\$ 2.458.350
2	CUNETA EN CONCRETO Y SISTEMA SUB-DREM				\$ 7.525.917
2.1	EXCAVACION EN ROCA	M3	18	\$ 59.615,110	\$ 1.073.072
2.2	CUNETAS EN CONCRETO 3000 PSI E=0.15	M3	3	\$ 275.277,660	\$ 825.833
2.3	REFUERZOS EN HIERRO DE 60.000 PSI.	KLS	193	\$ 3.098,207	\$ 597.954
2.4	MATERIAL FILTRANTE GRANULAR CANT.RODADO	M3	15	\$ 46.327,466	\$ 694.912
2.5	TUB.PVC 8 DREN.CF NOVAFOR	ML	28	\$ 96.434,000	\$ 2.700.152
2.6	ACARREO MATERIAL PETREO.VOL.COMPACT	M3K	1055	\$ 1.548,809	\$ 1.633.994
3	CONSTRUCCION BOX COULVERT				\$ 18.604.209
3.1	LOCALIZACION-REPLANTEO OBRA ARQUITECTON.	M2	28	\$ 3.324,670	\$ 93.091
3.2	EXCAVACION EN ROCA	M3	44	\$ 59.576,409	\$ 2.621.362
3.3	DEMOL.ALCANTARILLAS DIAM=20	ML	8	\$ 92.605,000	\$ 740.840
3.4	RETIRO SOBRANTES MAQUINA <=10KM.	M3	44	\$ 16.136,950	\$ 710.026
3.5	CONFORM.COMPACT.SUBRASANTE CBR=95	M2	28	\$ 2.450,670	\$ 68.619
3.6	SOLADO ESPESOR E=0.05M 3000 PSI 210 MPA	M2	28	\$ 18.194,960	\$ 509.459
3.7	RELLENO ROCAMUERTA COMPACT-RANA+ACARREO	M3	10	\$ 31.727,500	\$ 317.275
3.8	BOX COULVERT CONCRETO DE 3000 PSI	M3	18	\$ 480.147,160	\$ 8.642.649
3.9	ACERO REFUERZO FLEJADO 60000 PSI 420Mpa	KLS	1030	\$ 3.095,510	\$ 3.188.376
3.10	ACARREO MATERIAL PETREO.VOL.COMPACT	M3K	1106	\$ 1.548,383	\$ 1.712.512

Fuente: Elaboración propia con base a la información suministrada en la secretaria de obra pública e infraestructura de Buga.

Tabla 4. Asociación de actividades con letras y secuencia de precedencia.

N°	DESCRIPCION DE LA ACTIVIDAD	ACTIVIDAD	ACTIVIDAD PREDESESORA
1	MURO DE CONTENCION EN GAVIONES		-
1.1	CAMPAMENTO TABLA 18 M2	A	-
1.2	LOCALIZACION-REPLANTEO OBRA ARQUITECTON	B	A
1.3	RELLENO ROCAMUERTA COMPACT-RANA+ACARREO	C	D
1.4	EXCAVACION EN ROCA	D	A
1.5	SOLADO ESPESOR E=0.05M 3000 PSI 210 MPA	E	A
1.6	ZARPAS EN CONCRETO DE 3000 PSI.	F	E
1.7	CONTRAPISO REFORZADO E=10CM 3.000Psi	G	A
1.8	GAVIONES CALIBRE 12	H	F
1.9	ACARREO MATERIAL PETREO.VOL.COMPACT	I	D
1.10	PLANTA ELECTRICA 4000 RPM	J	A
2	CUNETA EN CONCRETO Y SISTEMA SUB-DREM		-
2.1	EXCAVACION EN ROCA	K	B
2.2	CUNETAS EN CONCRETO 3000 PSI E=0.15	L	G
2.3	REFUERZOS EN HIERRO DE 60.000 PSI.	M	E
2.4	MATERIAL FILTRANTE GRANULAR CANT.RODADO	N	E
2.5	TUB.PVC 8 DREN.CF NOVAFOR	O	F
2.6	ACARREO MATERIAL PETREO.VOL.COMPACT	P	E
3	CONSTRUCCION BOX COULVERT		
3.1	LOCALIZACION-REPLANTEO OBRA ARQUITECTON.	Q	P
3.2	EXCAVACION EN ROCA	R	Q
3.3	DEMOL.ALCANTARILLAS DIAM=20	S	Q
3.4	RETIRO SOBRANTES MAQUINA <=10KM.	T	R
3.5	CONFORM.COMPACT.SUBRASANTE CBR=95	U	T
3.6	SOLADO ESPESOR E=0.05M 3000 PSI 210 MPA	V	U
3.7	RELLENO ROCAMUERTA COMPACT-RANA+ACARREO	W	V
3.8	BOX COULVERT CONCRETO DE 3000 PSI	X	V
3.9	ACERO REFUERZO FLEJADO 60000 PSI 420Mpa	Y	V
3.10	ACARREO MATERIAL PETREO.VOL.COMPACT	Z	V

Fuente: Elaboración propia con base a la información suministrada en la secretaria de obra pública e infraestructura de Buga.

Tabla 5. Calculo del rendimiento de la mano de obra.

ACTIVIDAD	DESCRIPCIÓN DE LA ACTIVIDAD	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
		No. DE CUADRILLAS	TIPO DE CUADRILLA	No. DE HOMBRES / CUADRILLA	HOMBRES/DIA A*C*(J/I.T.)	CANTIDAD A MANO	RENDIM. UND/(DIA-CUADRILLA)	HOMBRES /UNIDAD	TOTAL HORAS-HOMBRE	% DE DEDICAC. MANO DE OBRA	DÍAS DE TRABAJO HOMBRE
		CONTRATISTA	CONTRATISTA	CONTRATISTA	A*C*(J/I.T.)	A. P UNIL	G/D	H/E	J*D	CONTRATISTA	CRONOGRAMA
1	MURO DE CONTENCIÓN EN GAVIONES										
1.1	CAMPAMENTO TABLA 18 M2	1	M.O. ALBANILERIA 2 AYUDANTE-1 OH	3	24	1	0.333333333	72	72	1	3.00
1.2	LOCALIZACIÓN-REPLANTEO OBRA ARQUITECTON	1	M.O. ALBANILERIA 2 AYUDANTE-1 OH	3	24	61	12.2	1.967213115	120	1	5.00
1.3	RELLENO ROCAMUERTA COMPACT-RANA+CARREO	1	M.O. ALBANILERIA 2 AYUDANTE	2	16	121	12.1	1.32231405	160	1	10.00
1.5	SOLADO ESPESOR E=0.05M 3000 PSI 210 MPA	1	M.O. ALBANILERIA 1 AYUDANTE-1 OH	2	16	16	5.333333333	3	48	1	3.00
1.6	ZARPAS EN CONCRETO DE 3000 PSI.	1	M.O. ALBANILERIA 3 AYUDANTE-1 OH	4	32	8	1.6	20	160	1	5.00
1.7	CONTRAPISO REFORZADO E=10CM 3.000Psi	1	M.O. ALBANILERIA 1 AYUDANTE-1 OH	2	16	12	4	4	48	1	3.00
1.8	GAVIONES CALIBRE 12	1	M.O. ALBANILERIA 5 AYUDANTE-1 OH	6	48	96	6.4	7.5	720	1	15.00
2	CUNETA EN CONCRETO Y SISTEMA SUB-DREM										
2.2	CUNETAS EN CONCRETO 3000 PSI E=0.15	1	M.O. ALBANILERIA 2 AYUDANTE-1 OH	3	24	3	0.6	40	120	1	5.00
2.3	REFUERZOS EN HIERRO DE 60.000 PSI.	1	M.O. ALBANILERIA 1 AYUDANTE	1	8	193	48.25	0.165803109	32	1	4.00
2.4	MATERIAL FILTRANTE GRANULAR CANT RODADO	1	M.O. ALBANILERIA 1 AYUDANTE	1	8	15	5	1.6	24	1	3.00
2.5	TUB. PVC 8 DREN CF NOVAFOR	1	M.O. HIDROSANIT. 1 AYUDANTE-1 OH	2	16	28	5.6	2.857142857	80	1	5.00
3	CONSTRUCCION BOX COULVERT										
3.1	LOCALIZACIÓN-REPLANTEO OBRA ARQUITECTON.	1	M.O. ALBANILERIA 2 AYUDANTE-1 OH	3	24	28	9.333333333	2.571428571	72	1	3.00
3.3	DEMOL-ALCANTARILLAS DIAM=20	1	M.O. ALBANILERIA 1 AYUDANTE-1 OH	2	16	8	1.6	10	80	1	5.00
3.4	RETIRO SOBRANTES MAQUINA <=10KM.	1	M.O. ALBANILERIA 1 AYUDANTE	1	8	44	8.8	0.909090909	40	1	5.00
3.5	CONFORM. COMPACT SUBRASANTE CBR=95	1	M.O. ALBANILERIA 3 AYUDANTE	3	24	28	7	3.428571429	96	1	4.00
3.6	SOLADO ESPESOR E=0.05M 3000 PSI 210 MPA	1	M.O. ALBANILERIA 1 AYUDANTE-1 OH	2	16	28	9.333333333	1.714285714	48	1	3.00
3.7	RELLENO ROCAMUERTA COMPACT-RANA+CARREO	1	M.O. ALBANILERIA 2 AYUDANTE	2	16	10	1	16	160	1	10.00
3.8	BOX COULVERT CONCRETO DE 3000 PSI	1	M.O. ALBANILERIA 3 AYUDANTE-1 OH	4	32	18	1.5	21.33333333	384	1	12.00
3.9	ACERO REFUERZO FLEJADO 60000 PSI 420Mpa	1	M.O. ALBANILERIA 1 AYUDANTE	1	8	1030	128.75	0.062135922	64	1	8.00

Fuente: Elaboración propia con base a la información suministrada en la secretaria de obra pública e infraestructura de Buga.

Tabla 6. Calculo del rendimiento de la maquinaria.

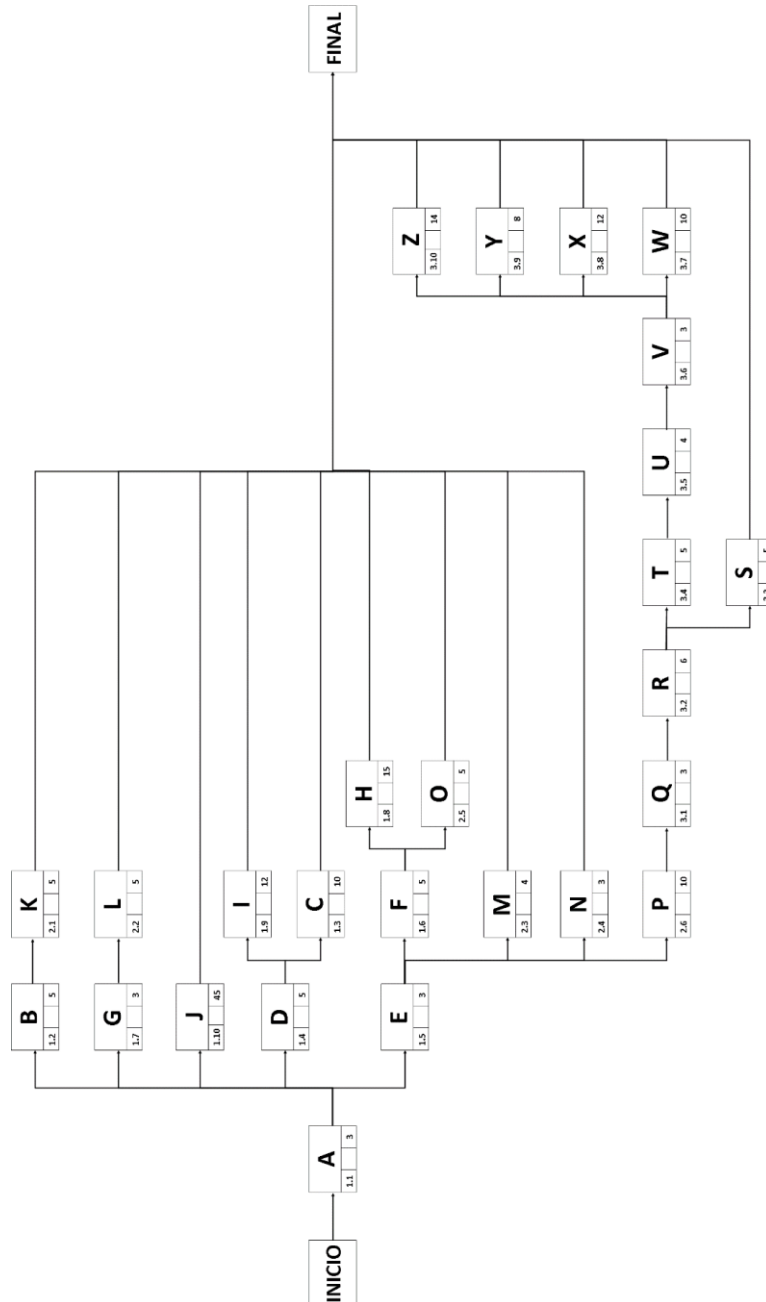
		A		B	C	D	E	F	G	H	I
ACTIVIDAD	DESCRIPCIÓN DE LA ACTIVIDAD	EQUIPO CRITICO DE LA ACTIVIDAD		No. DE MAQUINAS	HORAS MAQUINA /DÍA	CANTIDAD A MAQUINA	RENDIM. UNIDAD/HORAS MAQUINA	HORAS MAQUINA /UNIDAD	TOTAL HORAS MAQUINA	% DE DEDIC. MAQUINA	DÍAS DE TRABAJO MAQUINA
		CONTRATISTA		CONTRATISTA	B*H *(J.T.)	A. P.UNI.	D/F	G/D	I*C	CONTRATISTA	CRONOGRAMA
1	MURO DE CONTENCIÓN EN GAVIONES										
1.9	ACARREO MATERIAL PETREO. VOL. COMPACT	VOLQUETA(ACARREO)		1	8	533	44.42	0.180	96	100%	12
1.10	PLANTA ELECTRICA 4000 RPM	PLANTA ELECTRICA 4000 RPM		1	8	45	1.00	8.000	360	100%	45
2	CUNETA EN CONCRETO Y SISTEMA SUB-DREM										
2.1	EXCAVACION EN ROCA	COMPRESOR DE DOS MARTILLOS		1	8	18	3.60	2.222	40	100%	5
2.6	ACARREO MATERIAL PETREO. VOL. COMPACT	VOLQUETA(ACARREO)		1	8	1055	105.50	0.076	80	100%	10
3	CONSTRUCCION BOX COULVERT										
3.2	EXCAVACION EN ROCA	COMPRESOR DE DOS MARTILLOS		1	8	44	7.333	1.091	48	100%	6
3.10	ACARREO MATERIAL PETREO. VOL. COMPACT	VOLQUETA(ACARREO)		1	8	1106	79.00	0.101	112	100%	14

Fuente: Elaboración propia con base a la información suministrada en la secretaria de obra pública e infraestructura de Buga.

- Diseñar la red del proyecto de acuerdo a la relación de precedencia.

Para el segundo paso de la metodología se empleó el cronograma y la tabla 4 para modelar el diagrama de red. Garantizando que se cumplieran todas las precedencias establecidas en el proyecto y las fechas de realización de cada actividad. El resultado de este paso se puede observar en la ilustración 4.

Ilustración 4. Diagrama de red del proyecto.



Fuente: Elaboración propia con base a la información suministrada en la secretaria de obra pública e infraestructura de Buga.

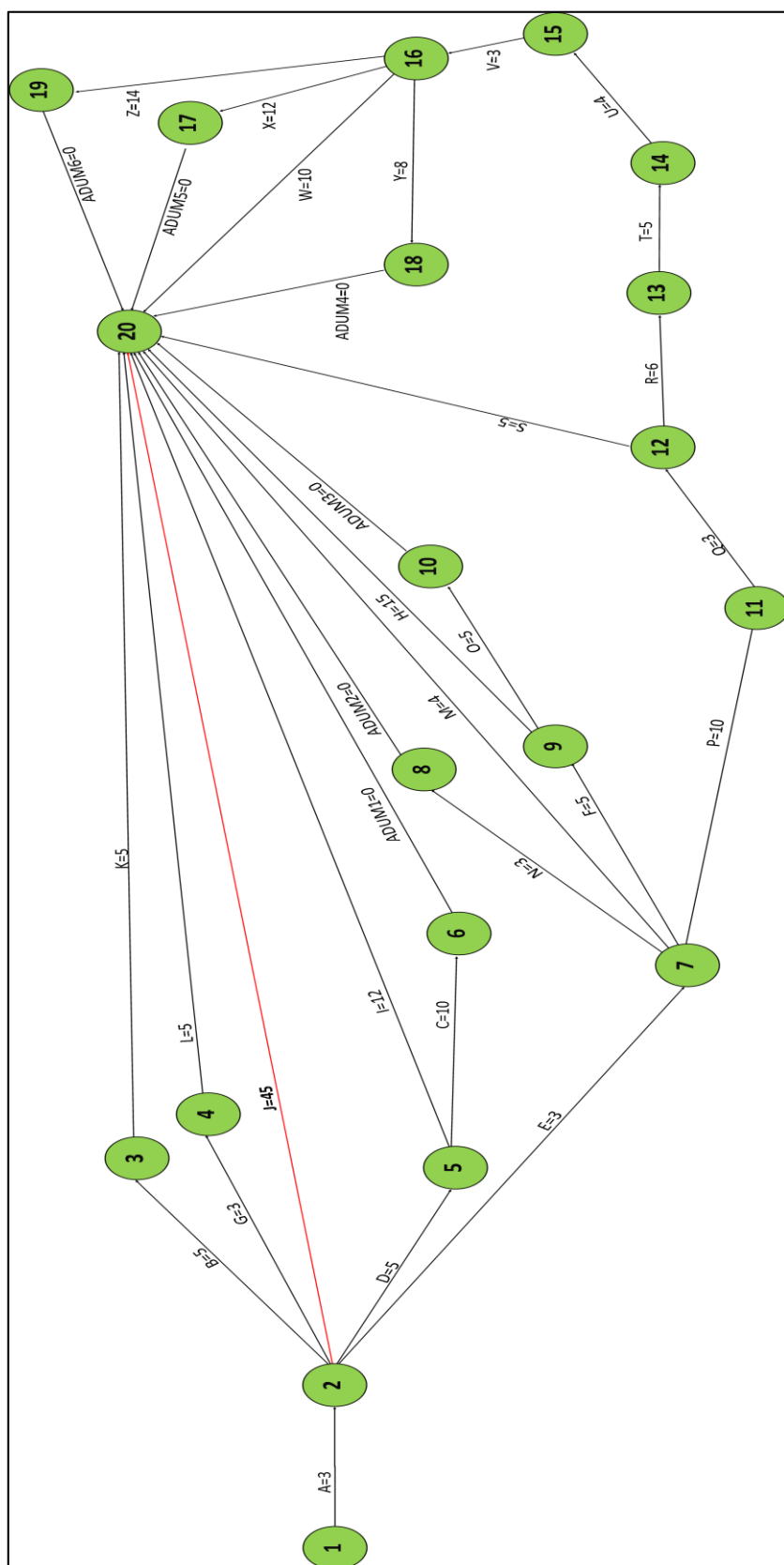
Luego de esto, se asociaron las actividades con eventos en la tabla 7 y se diseñó el grafico AOA tal como se muestra en la ilustración 5.

Tabla 7. Asociación de eventos con actividades.

N°	ACTIVIDAD	EVENTO INICIAL	EVENTO FINAL
1.1	A	1	2
1.2	B	2	3
1.3	C	5	6
1.4	D	2	5
1.5	E	2	7
1.6	F	7	9
1.7	G	2	4
1.8	H	9	20
1.9	I	5	20
1.10	J	2	20
2.1	K	3	20
2.2	L	4	20
2.3	M	7	20
2.4	N	7	8
2.5	O	9	10
2.6	P	7	11
3.1	Q	11	12
3.2	R	12	13
3.3	S	12	20
3.4	T	13	14
3.5	U	14	15
3.6	V	15	16
3.7	W	16	20
3.8	X	16	17
3.9	Y	16	18
3.10	Z	16	19
4.1	ADUM1	6	20
4.2	ADUM2	8	20
4.3	ADUM3	10	20
4.4	ADUM4	18	20
4.5	ADUM5	17	20
4.6	ADUM6	19	20

Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 5. Diagrama de asociación de eventos con actividades.



Fuente: Elaboración propia.

- **Determinar la ruta crítica y clasificar las actividades en críticas y no críticas.**

Con el diagrama de red elaborado, se continuó con la identificación de las actividades críticas del proyecto. Para esto se construyó la tabla 7, donde las actividades resaltadas y con holgura igual a 0 corresponden a las actividades críticas del proyecto.

Tabla 8. *Calculo de la holgura e identificación de las actividades críticas.*

N°	ACTIVIDAD	PRIMER INICIO (ES)	PRIMER FINAL (EF)	ULTIMO INICIO (LS)	ULTIMO FINAL (LF)	HOLGURA (LS -ES)
1.1	A	0	3	0	3	0
1.2	B	3	8	41	46	38
1.3	C	8	18	41	51	33
1.4	D	3	8	34	39	31
1.5	E	3	6	3	6	0
1.6	F	6	11	31	36	25
1.7	G	3	6	43	46	40
1.8	H	11	26	36	51	25
1.9	I	8	20	39	51	31
1.10	J	3	48	6	51	3
2.1	K	8	13	46	51	38
2.2	L	6	11	46	51	40
2.3	M	6	10	47	51	41
2.4	N	6	9	48	51	42
2.5	O	11	16	46	51	35
2.6	P	6	16	6	16	0
3.1	Q	16	19	16	19	0
3.2	R	19	25	19	25	0
3.3	S	19	24	46	51	27
3.4	T	25	30	25	30	0
3.5	U	30	34	30	34	0
3.6	V	34	37	34	37	0
3.7	W	37	47	41	51	4
3.8	X	37	49	39	51	2
3.9	Y	37	45	43	51	6
3.10	Z	37	51	37	51	0

Fuente: *Elaboración propia con base a la información suministrada en la secretaria de obra pública e infraestructura de Buga.*

- **Recolectar los datos de aceleración de actividades tales como costo Crashing y tiempo máximo que una actividad puede reducirse.**

Una vez identificada la ruta crítica, se procedió con la obtención del tiempo Crashing y costo Crashing. Para este paso se pidió la colaboración de un experto en el tema de obras de construcción con quien se evaluaron diferentes opciones. Las evaluaciones se enfocaron en las ocho actividades críticas ya que son las más importantes a tener en cuenta para la reducción del tiempo total. Debido a que cualquier reducción de tiempo en una actividad no crítica resultará en un costo adicional que al final no reduce la duración total del proyecto. En la siguiente tabla se observan las reducciones en tiempo de las actividades y el costo asociado a estas.

Tabla 9. Información suministrada por el experto en relación a la reducción de tiempo en las actividades críticas.

	DESCRIPCIÓN DE LA ACTIVIDAD	DURACIÓN	DURACIÓN CRASHING	COSTO INICIAL	COSTO CRASHING	COSTO ADICIONAL
A	CAMPAMENTO TABLA 18 M2	3	2	\$ 1.854.793	\$ 1.925.073	\$ 70.280
E	SOLADO ESPESOR E=0.05M 3000 PSI 210 MPA	3	0.5	\$ 287.120	\$ 384.900	\$ 97.780
P	ACARREO MATERIAL PETREO.VOL.COMPACT	10	8	\$ 1.633.994	\$ 1.774.554	\$ 140.560
Q	LOCALIZACION-REPLANTEO OBRA ARQUITECTON.	3	2	\$ 93.091	\$ 133.233	\$ 40.142
R	EXCAVACION EN ROCA	6	5	\$ 2.621.362	\$ 2.981.362	\$ 360.000
T	RETIRO SOBRANTES MAQUINA <=10KM.	5	4	\$ 710.026	\$ 850.586	\$ 140.560
U	CONFORM.COMPACT.SUBRASANTE CBR=95	4	3	\$ 68.619	\$ 86.189	\$ 17.570
V	SOLADO ESPESOR E=0.05M 3000 PSI 210 MPA	3	1	\$ 509.459	\$ 705.019	\$ 195.560
Z	ACARREO MATERIAL PETREO.VOL.COMPACT	14	13	\$ 1.712.512	\$ 1.738.867	\$ 26.355

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo a la información mostrada en la tabla 8 y a lo discutido con el experto se tiene que:

- La actividad A puede ser reducida 1 día, por medio de la adición de un ayudante durante toda la duración de la actividad. Lo cual generaría un costo adicional de \$70.280 pesos, que equivale al salario de dos días de un obrero.
- La actividad E puede ser reducida 2.5 días a través de la adición de dos ayudantes más una mezcladora. Lo cual tendría un costo adicional estimado de \$97.780 pesos. Valor que equivale a la contratación de dos obreros y el alquiler de la maquina durante medio día.
- La actividad P puede ser reducida 2 días por medio de la contratación de una volqueta adicional, es decir, para esta actividad se contaría con dos volquetas en total. Además de esto, se debe extender el tiempo de recibo de las volquetas en dos horas. El costo estimado de estas acciones es de \$140.560 pesos.
- La actividad Q puede ser reducida 1 día mediante la extensión de una hora de los horarios de trabajo de un oficial y un ayudante, es decir, para esta actividad los horarios de trabajo pasarían a ser de ocho horas. El costo generado por esto sería de \$40.142 pesos, que equivale a las horas extras de los trabajadores durante dos días.
- La actividad R puede ser reducida 1 día mediante el uso de un equipo Bothcat durante seis horas. El costo asociado a esto es de \$360.000 pesos, que equivale al alquiler del equipo durante seis horas.
- La actividad T puede ser reducida 1 día mediante la adición de dos ayudantes, que colaborarán en cualquier actividad necesaria durante todo un día. El costo estimado de esta acción es de \$140.560 pesos, que equivale al día de trabajo de los dos ayudantes.
- La actividad U puede ser reducida 1 día mediante la extensión de dos horas, durante un día, en el horario de trabajo de un ayudante, es decir, que el ayudante en cualquiera día en que se ejecute la actividad trabajara dos horas extras. El costo asociado a esto es de \$17.570 pesos que equivalen al costo de las dos horas extras del ayudante.

- La actividad V puede ser reducida 2 días mediante la adición de dos ayudantes más una mezcladora. Lo cual tendría un costo adicional estimado de \$195.560 pesos. Valor que equivale a la contratación de dos obreros y el alquiler de la máquina.
- La actividad Z puede ser reducida 1 día mediante la ampliación de una hora de la jornada de recibo de la volqueta, durante tres de los trece días que dura la actividad acelerada. El costo adicional de esta acción es igual a \$26.355 pesos, que equivale a las tres horas extras de la volqueta.

Por otro lado, cabe resaltar una actividad que presenta el potencial de ser una actividad crítica si se reduce la obra en más de tres días. Esta actividad es Planta Eléctrica 4000 RPM, la cual tiene una duración de 45 días y culmina tan solo 3 días antes de que termine el proyecto. De acuerdo a la información obtenida, esta actividad se refiere a la instalación, mantenimiento y uso de un equipo generador de energía. Es necesario este equipo debido a que no hay fuentes de energía cerca del lugar de la obra, lo que restringe el uso de herramientas eléctricas tales como soldadores. En el proyecto fue considerada una actividad debido a que los trabajadores tendrán que realizar varias acciones como lo es la limpieza, mantenimientos preventivos y correctivos, manejo, entre otras acciones.

Sin embargo, dentro de la evaluación de la propuesta metodológica no se consideró como una actividad sino simplemente como un costo directo de la obra. Ya que su duración está relacionada a la duración total de la obra, es decir, cualquier reducción que se presente en el tiempo de elaboración reducirá de igual manera esta actividad. Además de que el equipo debe ser entregado 3 días antes de que acabe la obra, ya que en ese momento no habrá la necesidad de utilizar herramientas eléctricas. Teniendo en cuenta esto, se ve la oportunidad de generar un ahorro en costos con la reducción del tiempo en que se alquila la planta eléctrica.

Además de esto, se estudiaron otras posibles rutas críticas que podrían surgir con la aceleración del proyecto. Con el objetivo de observar la duración de las otras rutas del proyecto se construyó la siguiente tabla.

Tabla 10. Duración de las otras rutas del proyecto.

RUTA	DURACIÓN
A-B-K	13
A-G-L	11
A-D-I	20
A-D-C	18
A-E-F-H	26
A-E-F-O	16
A-E-M	10
A-E-N	9
A-E-P-Q-R-S	30
A-E-P-Q-R-T-U-V-W	37
A-E-P-Q-R-T-U-V-X	49
A-E-P-Q-R-T-U-V-Y	35

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 9 podemos observar que la duración más cercana al de la ruta crítica es la ruta dada por las actividades A-E-P-Q-R-T-U-V-X, que presenta una duración de 49 días. Para que esta se convierta en la ruta crítica, la actividad Z deberá reducirse más de 2 días. No obstante, observando el tiempo máximo que las actividades se pueden reducir, se concluyó que no se generara una nueva ruta crítica aunque el proyecto se acelerara lo máximo posible.

- **Calcular la pendiente del costo sobre el tiempo para cada una de las actividades del proyecto.**

Con la información obtenida de los pasos anteriores, se procedió con el cálculo de la pendiente del costo sobre el tiempo. En la tabla 9 se muestra el resultado de este ejercicio y además se adicionan dos columnas que representan la variación del costo y la variación del tiempo si se aplica la técnica Crashing.

Tabla 11. Pendiente de costo de las actividades del proyecto.

N°	ACTIVIDAD	COSTO NORMAL (Cn)	DURACIÓN NORMAL (Tn)	COSTO CRASHING (Cc)	DURACIÓN CRASHING (Tc)	Δ COSTO (Cc- Cn)	Δ TIEMPO (Tn - Tc)	PENDIENTE DEL (Δ costo /Δ tiempo)
1.1	A	\$ 1.854.793	3	\$ 1.925.073	2	\$ 70.280	1	70.280
1.2	B	\$ 199.363	5	\$ 199.363	5	\$ -	-	-
1.3	C	\$ 3.855.816	10	\$ 3.855.816	10	\$ -	-	-
1.4	D	\$ 7.122.368	5	\$ 7.122.368	5	\$ -	-	-
1.5	E	\$ 287.120	3	\$ 384.900	0,5	\$ 97.780	2,5	39.112
1.6	F	\$ 3.501.056	5	\$ 3.501.056	5	\$ -	-	-
1.7	G	\$ 471.672	3	\$ 471.672	3	\$ -	-	-
1.8	H	\$ 13.338.528	15	\$ 13.338.528	15	\$ -	-	-
1.9	I	\$ 825.973	12	\$ 825.973	12	\$ -	-	-
1.10	J	\$ 2.458.350	45	\$ 2.458.350	45	\$ -	-	-
2.1	K	\$ 1.073.072	5	\$ 1.073.072	5	\$ -	-	-
2.2	L	\$ 825.833	5	\$ 825.833	5	\$ -	-	-
2.3	M	\$ 597.954	4	\$ 597.954	4	\$ -	-	-
2.4	N	\$ 694.912	3	\$ 694.912	3	\$ -	-	-
2.5	Ñ	\$ 2.700.152	5	\$ 2.700.152	5	\$ -	-	-
2.6	O	\$ 1.633.994	10	\$ 1.774.554	8	\$ 140.560	2	70.280
3.1	P	\$ 93.091	3	\$ 133.233	2	\$ 40.142	1	40.142
3.2	Q	\$ 2.621.362	6	\$ 2.981.362	5	\$ 360.000	1	360.000
3.3	R	\$ 740.840	5	\$ 740.840	5	\$ -	-	-
3.4	S	\$ 710.026	5	\$ 850.586	4	\$ 140.560	1	140.560
3.5	T	\$ 68.619	4	\$ 86.189	3	\$ 17.570	1	17.570
3.6	U	\$ 509.459	3	\$ 705.019	1	\$ 195.560	2	97.780
3.7	V	\$ 317.275	10	\$ 317.275	10	\$ -	-	-
3.8	W	\$ 8.642.649	12	\$ 8.642.649	12	\$ -	-	-
3.9	X	\$ 3.188.376	8	\$ 3.188.376	8	\$ -	-	-
3.10	Y	\$ 1.712.512	14	\$ 1.738.867	13	\$ 26.355	1	26.355

Fuente: Elaboración propia con base a la información suministrada en la secretaria de obra pública e infraestructura de Buga.

- **Formular el modelo matemático.**

Una vez se obtuvieron los datos requeridos en la metodología, se procedió a formular el modelo matemático. Se obtuvieron las siguientes ecuaciones que corresponden a la estructura básica del modelo matemático.

Función objetivo:

$$\begin{aligned} \text{Min } Z = & (70.208 \times X_A) + (48.890 \times X_E) + (70.280 \times X_P) + (40.142 \times X_Q) \\ & + (360.000 \times X_R) + (140.560 \times X_T) + (17.570 \times X_U) + (97.780 \\ & \times X_V) + (26.355 \times X_Z) \end{aligned}$$

Restricciones:**Restricción de reducción máxima:**

$$\begin{aligned} X_A \leq 1; X_B \leq 0; X_C \leq 0; X_D \leq 0; X_E \leq 2,5; X_F \leq 0; X_G \leq 0; X_H \leq 0; X_I \leq 0; \\ X_K \leq 0; X_L \leq 0; X_M \leq 0; X_N \leq 0; X_O \leq 0; X_P \leq 2; X_Q \leq 1; X_R \leq 1; X_S \leq 0; \\ X_T \leq 1; X_U \leq 1; X_V \leq 2; X_W \leq 0; X_X \leq 0; X_Y \leq 0; X_Z \leq 1 \end{aligned}$$

Momento en el que ocurre el evento inicial del proyecto:

$$M_1 = 0$$

Momento en el que ocurre un evento:

$M_2 - M_1 + X_A \geq D_A$	$M_{13} - M_{12} + X_R \geq D_R$
$M_3 - M_2 + X_B \geq D_B$	$M_{20} - M_{12} + X_S \geq D_S$
$M_6 - M_5 + X_C \geq D_C$	$M_{14} - M_{13} + X_T \geq D_T$
$M_5 - M_2 + X_D \geq D_D$	$M_{15} - M_{14} + X_U \geq D_U$
$M_7 - M_2 + X_E \geq D_E$	$M_{16} - M_{15} + X_V \geq D_V$
$M_9 - M_7 + X_F \geq D_F$	$M_{20} - M_{16} + X_W \geq D_W$
$M_4 - M_2 + X_G \geq D_G$	$M_{17} - M_{16} + X_X \geq D_X$
$M_{20} - M_9 + X_H \geq D_H$	$M_{18} - M_{16} + X_Y \geq D_Y$
$M_{20} - M_5 + X_I \geq D_I$	$M_{19} - M_{16} + X_Z \geq D_Z$
$M_{20} - M_3 + X_K \geq D_K$	$M_{20} - M_6 + X_{ADUM1} \geq 0$
$M_{20} - M_4 + X_L \geq D_L$	$M_{20} - M_8 + X_{ADUM2} \geq 0$
$M_{20} - M_7 + X_M \geq D_M$	$M_{20} - M_{10} + X_{ADUM3} \geq 0$
$M_8 - M_7 + X_N \geq D_N$	$M_{20} - M_{18} + X_{ADUM4} \geq 0$
$M_{10} - M_9 + X_O \geq D_O$	$M_{20} - M_{17} + X_{ADUM5} \geq 0$
$M_{11} - M_7 + X_P \geq D_P$	$M_{20} - M_{19} + X_{ADUM1} \geq 0$
$M_{12} - M_{11} + X_Q \geq D_Q$	

Duración del proyecto:

$$M_{20} \leq 40$$

Restricciones de no negatividad:

$$M_1 \geq 0; M_2 \geq 0; M_3 \geq 0; M_4 \geq 0; M_5 \geq 0; M_6 \geq 0; M_7 \geq 0; M_8 \geq 0; M_9 \geq 0;$$

$$M_{10} \geq 0; M_{11} \geq 0; M_{12} \geq 0; M_{13} \geq 0; M_{14} \geq 0; M_{15} \geq 0; M_{16} \geq 0; M_{17} \geq 0; M_{18} \geq 0; M_{19} \geq 0; M_{20} \geq 0$$

$$X_A \geq 0; X_B \geq 0; X_C \geq 0; X_D \geq 0; X_E \geq 0; X_F \geq 0; X_G \geq 0; X_H \geq 0; X_I \geq 0; X_K \geq 0; X_L \geq 0; X_M \geq 0; X_N \geq 0; X_O \geq 0; X_P \geq 0; X_Q \geq 0; X_R \geq 0; X_S \geq 0; X_T \geq 0; X_U \geq 0; X_V \geq 0; X_X \geq 0; X_Y \geq 0; X_Z \geq 0; X_{ADUM1} \geq 0; X_{ADUM2} \geq 0; X_{ADUM3} \geq 0; X_{ADUM4} \geq 0; X_{ADUM5} \geq 0; X_{ADUM6} \geq 0$$

Para la solución del modelo se empleó el programa de optimización Lingo que permite solucionar diferentes problemas de programación como la lineal. En el programa se agregaron los parámetros dados en las tablas anteriores y se corrió con fecha finalización esperada de 40 días.

- **Correr el modelo e identificar los costos obtenidos.**

Para este paso se corrió el modelo en el programa Lingo y se procedió a recolectar los resultados que arrojó. En el anexo 1 se presenta el modelo tal cual fue planteado. Luego, con sus resultados se elaboró la tabla 11, la cual resume toda la información obtenida del modelo.

Tabla 12. Resultados obtenidos de la aplicación de la propuesta metodológica.

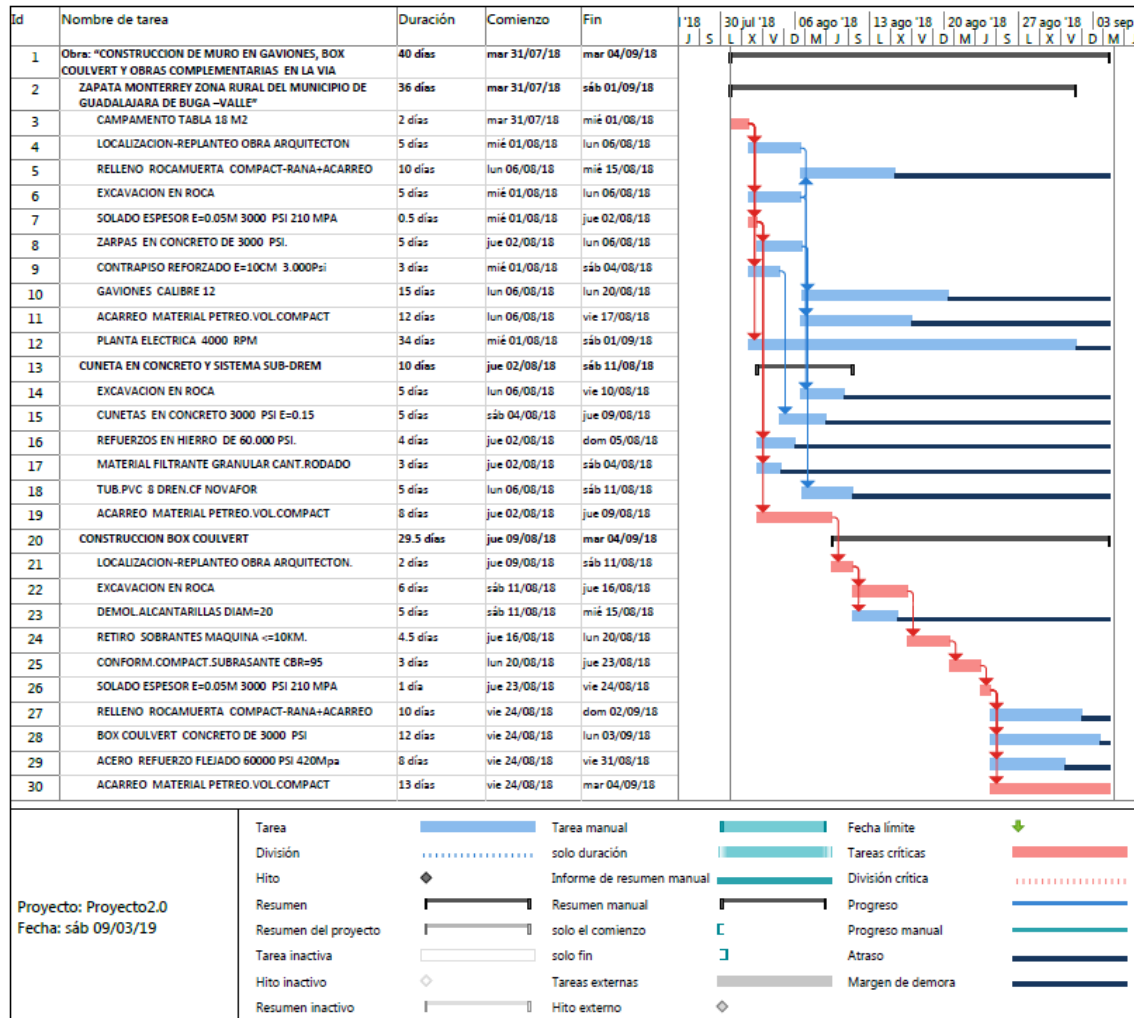
N°	DESCRIPCIÓN	DURACIÓN NORMAL	REDUCCIÓN	DURACIÓN FINAL	COSTO NORMAL	COSTO CRASHING
1.1	CAMPAMENTO TABLA 18 M2	3	1	2	\$ 1.854.793	\$ 70.280
1.2	LOCALIZACION-REPLANTEO OBRA ARQUITECTON	5	0	5	\$ 199.363	\$ -
1.3	RELLENO ROCAMUERTA COMPACT-RANA+ACARREO	10	0	10	\$ 3.855.816	\$ -
1.4	EXCAVACION EN ROCA	5	0	5	\$ 7.122.368	\$ -
1.5	SOLADO ESPESOR E=0.05M 3000 PSI 210 MPA	3	2,5	0,5	\$ 287.120	\$ 97.780
1.6	ZARPAS EN CONCRETO DE 3000 PSI.	5	0	5	\$ 3.501.056	\$ -
1.7	CONTRAPISO REFORZADO E=10CM 3.000Psi	3	0	3	\$ 471.672	\$ -
1.8	GAVIONES CALIBRE 12	15	0	15	\$ 13.338.528	\$ -
1.9	ACARREO MATERIAL PETREO.VOL.COMPACT	12	0	12	\$ 825.973	\$ -
1.10	PLANTA ELECTRICA 4000 RPM	45	11	34	\$ 2.458.350	\$ -
2.1	EXCAVACION EN ROCA	5	0	5	\$ 1.073.072	\$ -
2.2	CUNETAS EN CONCRETO 3000 PSI E=0.15	5	0	5	\$ 825.833	\$ -
2.3	REFUERZOS EN HIERRO DE 60.000 PSI.	4	0	4	\$ 597.954	\$ -
2.4	MATERIAL FILTRANTE GRANULAR CANT.RODADO	3	0	3	\$ 94.912	\$ -
2.5	TUB.PVC 8 DREN.CF NOVAFOR	5	0	5	\$ 2.700.152	\$ -
2.6	ACARREO MATERIAL PETREO.VOL.COMPACT	10	2	8	\$ 1.633.994	\$ 140.560
3.1	LOCALIZACION-REPLANTEO OBRA ARQUITECTON.	3	1	2	\$ 93.091	\$ 40.142
3.2	EXCAVACION EN ROCA	6	0	6	\$ 2.621.362	\$ -
3.3	DEMOL.ALCANTARILLAS DIAM=20	5	0	5	\$ 740.840	\$ -
3.4	RETIRO SOBRANTES MAQUINA <=10KM.	5	0,5	4,5	\$ 710.026	\$ 70.280
3.5	CONFORM.COMPACT.SUBRASANTE CBR=95	4	1	3	\$ 68.619	\$ 17.570
3.6	SOLADO ESPESOR E=0.05M 3000 PSI 210 MPA	3	2	1	\$ 509.459	\$ 195.560
3.7	RELLENO ROCAMUERTA COMPACT-RANA+ACARREO	10	0	10	\$ 317.275	\$ -
3.8	BOX COULVERT CONCRETO DE 3000 PSI	12	0	12	\$ 8.642.649	\$ -
3.9	ACERO REFUERZO FLEJADO 60000 PSI 420Mpa	8	0	8	\$ 3.188.376	\$ -
3.10	ACARREO MATERIAL PETREO.VOL.COMPACT	14	1	13	\$ 1.712.512	\$ 26.355
COSTO TOTAL NORMAL					\$ 60.045.165	
COSTO TOTAL CRASHING					\$ 658.527	
AHORRO GENERADO POR LA PLANTA ELÉCTRICA (\$54.630 X DIA)					\$ 600.930	
COSTO TOTAL DEL PROYECTO IMPLEMENTANDO LA TÉCNICA CRASHING					\$ 60.102.762	

Fuente: Elaboración propia.

Teniendo en cuenta la nueva duración de las actividades presentada en la tabla 11, se elaboró un nuevo cronograma de actividades que se presenta en la ilustración 6, donde se observa que el proyecto va desde el 31 de julio del 2018 hasta el 4 de septiembre 2018. Lo cual modificó la duración de cada etapa, siendo entonces la duración de la etapa uno “Muro de contención en Gaviones”

de 36 días, la segunda etapa “Cuneta en concreto y sistema sub-drenaje” de 10 días y la tercera etapa “Construcción Box Couvert” de 29,5 días.

Ilustración 6. Nuevo calendario del proyecto resultado de la aplicación de la técnica Crashing.



Fuente: Elaboración propia.

- **Analizar los resultados obtenidos y compararlos con los datos iniciales**

De acuerdo a los datos de la tabla 11 se vislumbra que el costo adicional que se debe invertir en el proyecto para que tenga una duración de 40 días es de \$658.527 pesos. Este precio se obtiene al acelerar las actividades:

“CAMPAMENTO TABLA 18 M2” en 1 día, “SOLADO ESPESOR E=0.05M 3000 PSI 210 MPA” en 2.5 días, “ACARREO MATERIAL PETREO.VOL.COMPACT” en 2 días, “LOCALIZACION-REPLANTEO OBRA ARQUITECTON” en 1 día, “RETIRO SOBRANTES MAQUINA <=10KM” en 0.5 día,

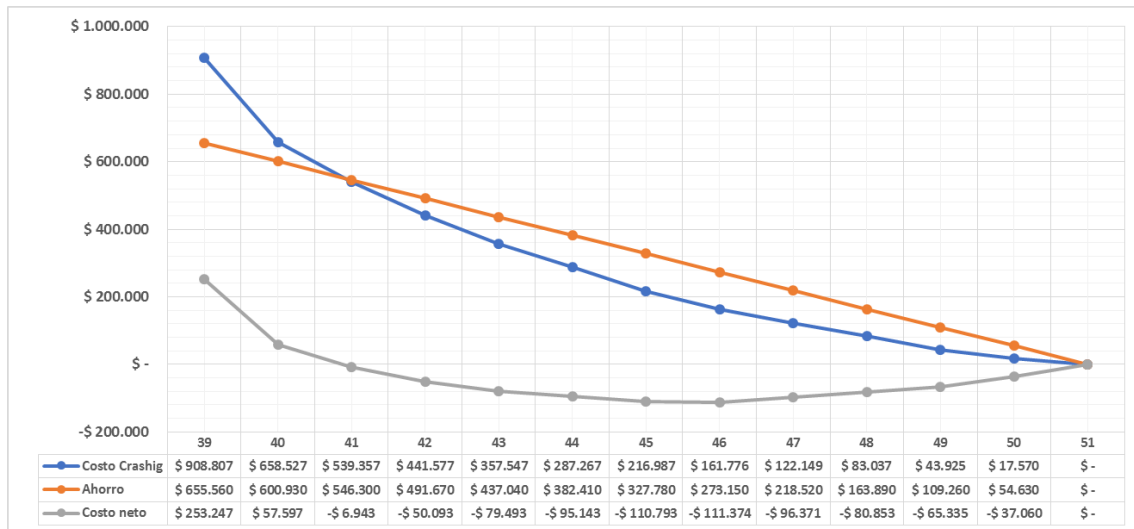
“CONFORM.COMPACT.SUBRASANTE CBR=95” en 1 día, “SOLADO ESPESOR E=0.05M 3000 PSI 210 MPA” en 2 días, “ACARREO MATERIAL PETREO.VOL.COMPACT” en 1 día.

Al reducir la duración del proyecto, se puede observar que la Planta Eléctrica 4000 RPM presenta una reducción con respecto a su costo asociado. Teniendo en cuenta que por cada día que disminuye su funcionamiento se genera un ahorro de \$54.630 pesos, en los 11 días que esta actividad disminuyo se consiguió un ahorro total de \$600.930 pesos.

Es por tanto, que si se aplica la metodología basada en el Crashing en la obra de construcción de la vía Zapata – Monterrey para reducir la duración total a 40 días, hubiera sido necesario invertir \$57.597 pesos adicionales. Lo cual representa una inversión mínima con respecto al número considerable de días que se redujo la obra.

Considerando que el resultado obtenido con la aplicación del modelo se ve afectado por el ahorro generado con la disminución de tiempo de operación de la planta eléctrica, se revisó el comportamiento de dicha variable comparándola con el aumento en el costo obtenido de la implementación de la técnica Crashing. Por tal motivo se evaluó el modelo matemático variando la duración esperada del proyecto de 39 a 51 días, para calcular el costo Crashing vs el ahorro generado. Como resultado se obtiene la ilustración 7.

Ilustración 7. Relación entre el costo Crashing y el ahorro asociado a la planta eléctrica.



Fuente: Elaboración propia.

En la ilustración 7 se observa que si se redujera el proyecto entre 50 y 41 días no sería necesario invertir dinero en la aplicación de la técnica Crashing. Por el contrario, se generaría un ahorro en los costos del proyecto. Esto debido a que al disminuir el tiempo de funcionamiento de la Planta Eléctrica, amortiza los costos asociados a la aceleración del proyecto.

Por otro lado, entre los días 40 y 41, existe un momento en el que el costo generado por la técnica Crashing se amortiza completamente con el ahorro generado por la planta eléctrica. Sin embargo, alcanzar esta fecha es poco realista debido a la dificultad de terminar en un tiempo específico del día.

Por último, se observa que si el proyecto alcanza una duración inferior a 41 días será necesario realizar una inversión adicional para que el proyecto pueda terminarse en la fecha deseada. Es necesario recalcar que no en todos los proyectos se van a obtener este tipo de resultados ya que no siempre se tienen actividades cuya duración esté directamente relacionada con la duración del proyecto.

8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Las obras de construcción en el Valle del Cauca, como proyecto, tienen una gran falencia en la organización y administración de las actividades. Hecho que se observa constantemente y se evidencia con varios casos en los que presentan demoras. Por lo que se ve una gran oportunidad en la implementación de metodologías basadas en técnicas de aceleración de proyectos como lo es el Crashing.

La metodología propuesta puede ser empleada tanto en construcciones públicas como en privadas. Ya que es aplicable siempre y cuando haya holgura en las actividades y se cuente con un cronograma de actividades, análisis de costos y análisis de recursos a emplear. También es aplicable no solo al principio de los proyectos sino también en el transcurso de ellos, esto con tan solo bloquear las actividades ya desarrolladas, es decir, teniendo en cuenta únicamente las actividades que aún no se han desarrollado. Por lo que se puede observar que tiene una gran funcionalidad en los proyectos de construcción.

Para la implementación de la metodología es necesario la experiencia de algún ingeniero o maestro de obra, quien conozca detalladamente el funcionamiento de las obras de construcción. Por lo que se sugiere el trabajo conjunto con ellos o que sean estos mismos quienes apliquen la metodología. Ya que por su experiencia, están más relacionados con lo que pueden ser maneras de reducir la duración de las actividades y su costo asociado.

Los resultados que arrojó el caso de estudio demuestran que la metodología genera beneficios en cuestión de tiempo con costos asumibles e incluso, dependiendo de la reducción, se generan ahorros en los costos totales. Siendo aplicable a casos reales de proyectos de construcción antes y después de su inicialización. Permitiendo al que la usa observar el comportamiento de las actividades y generar tanto análisis y estrategias para la inversión de recursos con el objetivo de acelerar el proyecto.

Uno de los mayores beneficios que ofrece la metodología es el resaltar la importancia de las actividades críticas. De acuerdo a comentarios del experto, normalmente las obras de construcción no tienen en cuenta este aspecto a pesar de poseer un cronograma y en algunos casos la secuenciación de las actividades. Por lo que deciden inyectar recursos a actividades no críticas en aras de reducir el tiempo de finalización del proyecto. Sin darse cuenta que en realidad están desperdiciando recursos sin ser efectivos. Es por tanto, que al detallar la ruta crítica, los encargados de los proyectos pueden generar estrategias óptimas y eficientes que generaran mejores resultados.

Con respecto al primer objetivo planteado en el trabajo se concluyó que el proceso de contratación de las obras solo esta estandarizado en las obras públicas. Las obras privadas manejan un sistema parecido pero no igual ya que varía dependiendo de las necesidades y metas del oferente. Sin embargo, tanto las obras publicas y privadas presentan problemas de desfase. Por lo que la implementación de una metodología que utiliza herramientas de gestión de proyectos puede brindar excelentes resultados en la ejecución de las obras de construcción.

En cuanto al segundo objetivo, aunque se logró crear una metodología basada en el Crashing, difícilmente esta puede ser trabajada en el cien por ciento de las obras de construcción. Debido a diferentes variables y factores que rodean cada proyecto. Aunque similares, cada proyecto es diferente y cumple necesidades específicas. Puede haber casos en los que no sea posible el aumento de recursos, como por ejemplo, la falta de disposición de las personas de trabajar horas extras o falta de personal para contratar. Sin embargo, en aquellos casos en los que es posible el aumento de recursos, la metodología propuesta puede ser empleada.

Sobre el tercer objetivo, se observó que el modelo puede ser trabajado en casos reales y presenta buenos resultados. Sin embargo, la validación no tuvo en cuenta la calidad de las actividades. Se asume que al aumentar los recursos y

acelerar las actividades, las actividades tendrán la misma calidad. Hecho que probablemente no ocurra en todos los casos debido a las diferencias entre trabajadores o maquinaria. Por lo que se recomienda para un estudio posterior, tener en cuenta este aspecto y/o mantener informado a quien emplea la metodología de tener en mente la calidad de las operaciones a la hora de dar sugerencia en la aceleración de actividades. Además se tuvo una óptica general suponiendo un ambiente continuo, se puede decir que para futuros trabajos se puede probar enfoques discretos e incluso con riesgos.

En general, el trabajo cumplió con los objetivos propuestos inicialmente al proponer una metodología basada en la técnica de aceleración de proyectos Crashing que además arrojó resultados adecuados y es aplicable a casos de la vida real. También, permite a ingenieros de poca experiencia reducir la duración de proyectos de construcción, acción que normalmente solo son capaces los ingenieros más experimentados. Además, esta metodología puede ser aplicada a diferentes proyectos más allá de la construcción.

9. ANEXO

Anexo 1. Modelo matemático formulado en el programa Lingo.

```
!Modelo matematico de minimizacion del costos;
MODEL:

SETS:

    !Indice j;
    EVENTO/1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20/:MOMENTO;

    !Indice i;
    ACTIVIDAD/A B C D E F G H I K L M N O P Q R S T U V W X Y Z ADUM1
    ADUM2
                ADUM3 ADUM4 ADUM5
    ADUM6/:PENDIENTE,LIMITE,DURACION,REDUCCION;

    !Las variables del modelo son:
        REDUCCION(i): Cantidad de tiempo que se reduce la actividad i
        MOMENTO(j): Momento en el que ocurre el evento j;

ENDSETS

DATA:

    !Tiempo de finalizacion deseada del proyecto = 40 dias;

    !Pendiente del costos;
    PENDIENTE = 70280 0 0 0 39112 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 70280 40142 360000 0
    140560 17570 97780 0 0 0 26355 0 0 0 0 0 0;

    !Tiempo maximo en que se puede reducir la actividad i;
    LIMITE = 1 0 0 0 2.5 0 0 0 0 0 0 0 0 0 2 1 1 0 1 1 2 0 0 0 1 0 0 0 0
    0 0;

    !Duracion de la actividad i;
    DURACION = 3 5 10 5 3 5 3 15 12 5 5 4 3 5 10 3 6 5 5 4 3 10 12 8 14 0
    0 0 0 0 0;

ENDDATA

!Funcion objetivo: Minimizacion del costo;
MIN = @SUM(ACTIVIDAD(I):PENDIENTE(I)*REDUCCION(I));

!Restriccion 1: Reduccion maxima de tiempo en las actividades;
@FOR(ACTIVIDAD(I):REDUCCION(I) <= LIMITE(I));

!Restriccion 2: Momento en el que ocurre el evento inicial;
MOMENTO(1) = 0;

!Restriccion 3: Momento en el que ocurre un evento;
MOMENTO(2)-MOMENTO(1)+REDUCCION(1) >= DURACION(1);
MOMENTO(3)-MOMENTO(2)+REDUCCION(2) >= DURACION(2);
MOMENTO(4)-MOMENTO(2)+REDUCCION(7) >= DURACION(7);
MOMENTO(5)-MOMENTO(2)+REDUCCION(4) >= DURACION(4);
```

```

MOMENTO (6) -MOMENTO (5) +REDUCCION (3) >= DURACION (3);
MOMENTO (7) -MOMENTO (2) +REDUCCION (5) >= DURACION (5);
MOMENTO (8) -MOMENTO (7) +REDUCCION (13) >= DURACION (13);
MOMENTO (9) -MOMENTO (7) +REDUCCION (6) >= DURACION (6);
MOMENTO (10) -MOMENTO (9) +REDUCCION (14) >= DURACION (14);
MOMENTO (11) -MOMENTO (7) +REDUCCION (15) >= DURACION (15);
MOMENTO (12) -MOMENTO (11) +REDUCCION (16) >= DURACION (16);
MOMENTO (13) -MOMENTO (12) +REDUCCION (17) >= DURACION (17);
MOMENTO (14) -MOMENTO (13) +REDUCCION (19) >= DURACION (19);
MOMENTO (15) -MOMENTO (14) +REDUCCION (20) >= DURACION (20);
MOMENTO (16) -MOMENTO (15) +REDUCCION (21) >= DURACION (21);
MOMENTO (17) -MOMENTO (16) +REDUCCION (23) >= DURACION (23);
MOMENTO (18) -MOMENTO (16) +REDUCCION (24) >= DURACION (24);
MOMENTO (19) -MOMENTO (16) +REDUCCION (25) >= DURACION (25);
MOMENTO (20) -MOMENTO (19) +REDUCCION (31) >= DURACION (31);
MOMENTO (20) -MOMENTO (17) +REDUCCION (30) >= DURACION (30);
MOMENTO (20) -MOMENTO (16) +REDUCCION (22) >= DURACION (22);
MOMENTO (20) -MOMENTO (18) +REDUCCION (29) >= DURACION (29);
MOMENTO (20) -MOMENTO (12) +REDUCCION (18) >= DURACION (18);
MOMENTO (20) -MOMENTO (10) +REDUCCION (28) >= DURACION (28);
MOMENTO (20) -MOMENTO (9) +REDUCCION (8) >= DURACION (8);
MOMENTO (20) -MOMENTO (7) +REDUCCION (12) >= DURACION (12);
MOMENTO (20) -MOMENTO (8) +REDUCCION (27) >= DURACION (27);
MOMENTO (20) -MOMENTO (6) +REDUCCION (26) >= DURACION (26);
MOMENTO (20) -MOMENTO (5) +REDUCCION (9) >= DURACION (9);
MOMENTO (20) -MOMENTO (4) +REDUCCION (11) >= DURACION (11);
MOMENTO (20) -MOMENTO (3) +REDUCCION (10) >= DURACION (10);

```

```

!Duracion del proyecto;

```

```

MOMENTO (20) <= 40;

```

```

!Duracion de la actividad Planta electrica;

```

```

PLANTA = MOMENTO (20) -MOMENTO (2) -3;

```

```

!Restriccion de no negatividad;

```

```

@FOR (EVENTO (J) : MOMENTO (J) >= 0);

```

```

@FOR (ACTIVIDAD (I) : REDUCCION (I) >= 0);

```

```

END

```

Fuente: Elaboración propia.

10. BIBLIOGRAFÍA

- Afruzi, E. Roghanian, E. Najafi, A. Mazinani, M. (2013). A multi-mode resource-constrained discrete time–cost tradeoff problem solving using an adjusted fuzzy dominance genetic algorithm. Iran. Tehran: K.N. Toosi University of Technology.
- 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.
- Aguilar, C. Rangel, L. (2017). Aplicación de una metodología de control probabilístico de proyectos en construcción. Caso: Proyecto subsector construcción en Cali. [Tesis de ingeniería industrial]. Cali: Universidad del Valle, Facultad de ingeniería.
- Alderton, M. (2015). Colombia crece exponencialmente en gerencia de proyectos. Recuperado de: http://www.pmnetwork-spanish.com/pmnetworksp/febrero_2015?pg=36#pg36
- Asrul, I. (2013). Optimization in Crashing Project Schedule with methods selection. Indonesia: Pancasila University.
- Azofeifa, C. (2015). Aplicación del método CPM intercambio costo-tiempo a la Evaluación de Proyectos. Costa Rica: Montes de Ocas.
- Burgos, M. Vela, D. (2015). Análisis de las causas del incumplimiento de la programación en las obras civiles. [Tesis de ingeniera civil]. Cali: Universidad Militar Nueva Granada, Facultad de ingeniería.
- Camara de comercio de Cali. (2016). Balance económico de Cali y el Valle del Cauca en 2016. Recuperado de: <https://www.ccc.org.co/file/2017/01/Balance-economico-de-Cali-y-el-Valle-del-Cauca-en-2016.pdf>.
- Colombia Compra Eficiente. (2015). Guía para los Procesos de Contratación de obra pública.
- Colombia Compra Eficiente. (2016). Pliego de condiciones tipo para contratos de obra pública.

- Colombia Compra Eficiente. (2018). Recuperado de: <https://www.colombiacompra.gov.co/colombia-compra/colombia-compra-eficiente>.
- Congreso de la república. (1993). Ley 80 de 1993.
- Congreso de la república. (2007). Ley 1150 de 2007.
- Congreso de la república. (2008). Decreto 2474 del 2008.
- Congreso de la república. (2011). Ley 1474 de 2011.
- Congreso de la república. (2012). Decreto 019 del 2012.
- Congreso de la república. (2013). Ley 1510 de 2013.
- Congreso de la república. (2014). Ley 1712 de 2014.
- Congreso de la república. (2015). Decreto 1082 del 2015.
- Congreso de la república. (2018). Ley 1882 de 2018.
- DANE (Departamento de asuntos Económicos y Sociales). (2009). Clasificación Industrial Internacional Uniforme De Todas Las Actividades Económicas. Revisión 4 adaptada para Colombia CIIU Rev. 4 A.C. (Vol. 130, 160).
- Diaby, M. Cruz, J. Nsakanda, A. (2011). Project Crashing in the presence of general non-linear activity time reduction costs. International Journal of Operational Research.
- Empresa constructora VISE. (2016). Diferencia entre obra pública, obra privada y obra civil. Recuperado de: <http://blog.vise.com.mx/diferencias-entre-obra-publica-obra-privada-y-obra-civil>.
- El oficial, Información que construye. (2018). Costos directos e indirectos de una obra civil. Guayaquil, Ecuador. Recuperado de: <http://www.eloficial.ec/modulo-3-analisis-de-costos-costos-directos-e-indirectos-de-una-obra-civil/>.
- Elmabrouk, O. (2012). Scheduling Project Crashing Time using Linear Programming Technique. Libya: Benghazi University. Department of Industrial and Manufacturing System Engineering.
- Escuela de organización industrial. (2014): "Herramienta más útil en Dirección de Proyectos". Recuperado de:

<http://www.eoi.es/blogs/mintecon/2014/12/14/herramienta-mas-util-en-direccion-de-proyectos-punto-de-vista-ing-cedano/>.

- Garcia, A. Ortega, M. (2012). Programación lineal. España: Universidad Politécnica de Madrid.
- Ghoddousi, P. Eshtehardian, E. Jooybanpour, S. Javanmardi, A. (2012). Multi-mode resource-constrained discrete time-cost-resource optimization in project scheduling using non-dominated sorting genetic algorithm. Iran: Tehran.
- Gomez, F. Londoño, M. Montoya, C. (2014). Análisis de la aplicabilidad de las técnicas para la gestión del tiempo en proyectos según PMBOK 5ta edición. [Tesis de especialización gestión integral de proyectos]. Cali: Universidad de San Buenaventura, Facultad de ingeniería.
- Farcimar. (2019). Box-Culvert (Marcos). Recuperado de: <http://www.farcimar.pt/es/productos-y-servicios/recogida-y-conduccion-de-agua-en-redes-viarias/box-culvert-marcos/>.
- Haouari, M. (2015). A hybrid simulation-optimization approach for the robust Discrete Time/Cost Trade-off Problem. Qatar: Qatar University.
- Hernandez, D. Bluhm, J. (2016). Conceptos básicos de programación lineal y aplicación en el manejo de recursos naturales. Revista del Doctorado Interinstitucional en Ciencias Ambientales.
- Ibarguen, L. (2016). Comparación de técnicas de medición del desempeño de proyectos basadas en la metodología de valor ganado [Tesis de ingeniería industrial]. Cali: Universidad del Valle, Facultad de ingeniería.
- Ingeniero de caminos. (2018). Muro de Gaviones de piedra. Recuperado de: <https://ingeniero-de-caminos.com/muro-gaviones/>.
- JongYul, K. ChangWook, K. InKeuk, H. (2011). A practical approach to project scheduling: considering the potential quality loss cost in the time–cost tradeoff problem. Korea.
- Karmaker, C. Halder, P. (2017). Scheduling Project Crashing Time Using Linear Programming Approach: Case Study. Bangladesh: Jessore University of Science and Technology. Department of Industrial and Production Engineering.

- Khalaf, W. Bakar, M. Leong, W. Lee, L. (2010). A linear programming approach to maximize savings by stretching noncritical activities. Australia: Australian Journal of Basic and Applied Sciences.
- Luis, S. Leonardo, S. Tulio, M. (2014). Gerencia de proyectos y estrategia organizacional. Un modelo de madurez Primera edición. Cali, Colombia.
- Maestre, M. (2014). Técnicas Clásicas de Optimización. Parte I: Programación Lineal y No Lineal. España. Valencia: Universidad del País Vasco, Facultad de Ciencia y Tecnología.
- Mccopa. (2019). Construcción Pan-Americana: Obras públicas de Colombia presentan retrasos del 41%. Recuperado de: <https://www.construccion-pa.com/noticias/obras-publicas-de-colombia-presentan-retrasos-del-41/>
- Mohammad, I. Baktiar, R. Shuddasatwa, R. Tasnima, A. (2004). Crashing Project Time with Least Cost: A Linear Programming Approach. Journal of Business Research, Vol. 6. Recuperado de: <https://ssrn.com/abstract=1012525>.
- Mohanty, A. Mishra, J. Satpathy, B. (2011). Activity modes selection for project Crashing through deterministic simulation. India: College of Engineering and Technology Bhubaneswar, Sambalpur University.
- OBS Business School. (2016): “¿Cuáles son las etapas de ejecución de un proyecto de obra civil?”. Recuperado de: <https://www.obs-edu.com/int/blog-project-management/noticias/cuales-son-las-etapas-de-ejecucion-de-un-proyecto-de-obra-civil>.
- Olalde, K. (2012). Departamento de Expresión Gráfica y Proyectos de Ingeniería: Escuela Universitaria de Ingeniería de Vitoria-Gasteiz. Recuperado de: <http://www.ehu.eus/asignaturasKO/PM/Gestion/gespro1va.htm>.
- Perez, D. Caicedo, J. (2010). Los factores que afectan el buen desarrollo de las obras en el país. Bogotá.
- Periódico el tiempo. (2015): “Construcción del parque Bicentenario sigue con retrasos”. Recuperado de: <http://www.eltiempo.com/archivo/documento/CMS-15592277>.

- Project management institute (2014). Guía de los FUNDAMENTOS PARA LA DIRECCIÓN DE PROYECTOS (GUIA DEL PMBOK) Quinta edición. Estados Unidos de América.
- Remon, A. (2013). RPERT: Repetitive-Projects Evaluation and Review Technique. Alejandría Egipto.
- Revista ARQHYS. (2012). “Retrasos en la construcción”. Recuperado de: <http://www.arqhys.com/articulos/retrasos-construccion.html>.
- Sahu, K. Sahu, M. (2014). Cost & Time and Also Minimum Project Duration Using Alternative Method. India.
- Salas, H. (2017). Programación lineal aplicada. Bogota.
- Samer, S., Mohamed, H. (2015) .A hybrid simulation-optimization approach for the robust Discrete Time/Cost Trade-off Problem. Catar.
- Secretaria de obras públicas e infraestructura. (2018). Estudios previos construcción de muro en gaviones, Box Culvert y obras complementarias en la via Zapata Monterrey zona rural del municipio de Guadalajara de Buga – Valle. Recuperado de: <https://www.contratos.gov.co/consultas/detalleProceso.do?numConstancia=18-21-6400>
- Standish Group (2015). Chaos Report. Q&A con Jennifer Lynch
- Vasquez, J. (2017, Octubre 27). Secretario de obras pública. Entrevista personal. Buga
- Vasquez, S. (2015). Programación lineal. Aplicaciones a la Economía y a la Empresa. [Trabajo de fin de grado]. España: Universidade da Coruña, Facultad de Economía e Empresa.
- Velez, G. (1998). Proyectos formulación, evaluación y control. Colombia: Cali.
- Wradio. (2013). Actualidad: Obras del sistema de transporte en Popayán presentan retrasos del 72%. Recuperado de: <http://www.wradio.com.co/noticias/actualidad/obras-del-sistema-de-transporte-en-popayan-presentan-retrasos-del-72/20131022/nota/1999771.aspx>
- Yang, I. (2011). Stochastic time-cost tradeoff analysis: A distribution-free approach with focus on correlation and stochastic dominance. Taiwan: Taipei.