

**APLICACIÓN DEL ALGORITMO GENÉTICO NO DOMINADO NSGA-II PARA LA
ACELERACIÓN DE PROYECTOS DE CONSTRUCCIÓN A TRAVÉS DE LA
SOLUCIÓN DEL PROBLEMA DE COMPENSACIÓN DISCRETA TIEMPO-
COSTO (DTCTP) EN UNA OBRA CIVIL DEL VALLE DEL CAUCA**

**JOSÉ DEYSON VELÁSQUEZ SÁNCHEZ
JOSÉ MIGUEL VILLOTA RODRÍGUEZ**

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA ACADÉMICO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL (3751)
ZARZAL-VALLE DEL CAUCA
2019**

**APLICACIÓN DEL ALGORITMO GENÉTICO NO DOMINADO NSGA-II PARA LA
ACELERACIÓN DE PROYECTOS DE CONSTRUCCIÓN A TRAVÉS DE LA
SOLUCIÓN DEL PROBLEMA DE COMPENSACIÓN DISCRETA TIEMPO-
COSTO (DTCTP) EN UNA OBRA CIVIL DEL VALLE DEL CAUCA**

**JOSE DEYSON VELÁSQUEZ SÁNCHEZ
JOSÉ MIGUEL VILLOTA RODRÍGUEZ**

Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniero Industrial

**Director
ÁLVARO JULIO CUADROS LÓPEZ**

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA ACADÉMICO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL (3751)
ZARZAL-VALLE DEL CAUCA
2019**

Tabla de contenido

INTRODUCCIÓN	5
CAPÍTULO 1	7
1. 1 PROBLEMA	7
1.1.1 Antecedentes.....	7
1.1.2 Planteamiento.....	8
1.1.3 Formulación del problema.	8
1. 2 OBJETIVOS	8
1.2.1 Objetivo general.....	8
1.2.2 Objetivos específicos.....	9
1. 3 JUSTIFICACIÓN	9
1. 4 MARCO DE ANTECEDENTES	9
1. 5 MARCO TEÓRICO.....	11
CAPÍTULO 2	18
2.1 MÉTODOS Y CRITERIOS DTCTP	18
2.2 DTCTP DETERMINÍSTICOS	19
2.1.1 Modelos Mono-objetivo.....	19
2.1.2 Modelos multiobjetivo.	21
2.3 DTCTP PROBABILÍSTICOS O ESTOCÁSTICOS	22
2.4 CONCLUSIONES.....	23
CAPÍTULO 3	24
3.1 CONTEXTUALIZACIÓN DEL SECTOR CONTRUCCIÓN EN EL VALLE DEL CAUCA EN EL AÑO 2018	24
3.2 EMPLEABILIDAD.....	25
3.3 LICENCIAS DE CONSTRUCCIÓN	26
3.4.1 Área licenciada en el Valle del Cauca..	27
3.4.2 Área licenciada en los municipios de Zarzal y Roldanillo Valle del Cauca. 28	
3.4 CONCLUSIONES.....	29
CAPÍTULO 4	30
4.1 MODELACIÓN MATEMÁTICA.....	30
4.2 ACERCA DEL PROYECTO DE CONSTRUCCIÓN	34
4.3 APLICACIÓN DEL ALGORITMO PARA OPTIMIZAR TIEMPO-COSTO EN EL PROYECTO DE CONSTRUCCIÓN	35

4.4	RESULTADOS.....	41
4.5	CONCLUSIONES.....	46
	CONCLUSIONES.....	49
	BIBLIOGRAFÍA	50
	ANEXOS	54

Lista de tablas

Tabla 1.	Programación del proyecto.....	35
Tabla 2.	Costos directos y tiempo de terminación por módulo.	35
Tabla 3.	Datos de entrada tiempo-costos	36
Tabla 4.	Resultados módulo 1 de tiempo-costos, valores de compresión y retraso en actividades.	42
Tabla 5.	Tiempo-costos solución factible módulo 1.....	43
Tabla 6.	Duración de las actividades módulo 1, solución 1 a 25.	44
Tabla 7.	Comparativo	47
Tabla 8.	Costos indirectos y costos totales del módulo 1 del proyecto.	60

Lista de gráficos

Figura 1.	Ejemplo de Método de la Ruta Crítica.....	12
Figura 2.	Aptitud de cromosomas.....	13
Figura 3.	Selección probabilística de Cromosomas	13
Figura 4.	Representación de Cruzamiento en un punto	14
Figura 5.	Representación de Mutación de genes	14
Figura 6.	Representación del proceso de un Algoritmo Genético	15
Figura 7.	Selección de individuos del NSGA II	16
Figura 8.	Diagrama de Flujo del NSGA-II	17
Figura 9.	Licencias de construcción a nivel nacional.....	26
Figura 10.	Área licenciada para construcción de Obras civiles y Edificaciones por Departamento.....	27
Figura 11.	Destinos de área licenciada	28
Figura 12.	Participación de rubros licenciados Municipio de Zarzal y Roldanillo..	29
Figura 13.	Relación entre duración de las Actividades y el Costo.....	32
Figura 14.	Diagrama de red del proyecto	38
Figura 15.	Interfaz algoritmo genético NSGA-II.....	40
Figura 16.	Frente de Pareto módulo 1.....	44
Figura 17.	Frente de Pareto módulo 2.....	45
Figura 18.	Frente de Pareto módulo 3.....	46
Figura 19.	Frente de Pareto módulo 4.....	46

INTRODUCCIÓN

En este proyecto se aborda temas inherentes al campo de la Ingeniería Industrial relacionados con la gerencia de proyectos. Un proyecto se define exitoso cuando se cumple dentro de las restricciones que se otorgaron en el momento de liderar la ejecución del proyecto, restricciones como tiempo, costo y alcance, todos enmarcados en el enfoque de calidad (Project Management Institute, 2013), variables que se deben tener en cuenta en la planeación, programación y ejecución de un proyecto.

Mientras se ejecuta un proyecto es susceptible a factores (retrasos en las actividades, variación del clima, nuevos acuerdos de tiempo, presupuesto) que desequilibren la ecuación y por ende ocasione que las variables crezcan o decrezcan, tomando como ejemplo el tiempo, su variación repercutirá en la duración total del proyecto. Según Hazir, Erel, & Gunalay (2011) es en ese instante donde se debe con algunos costos adicionales reducir la duración de las actividades y agilizar la finalización del proyecto a un mínimo costo, teniendo en cuenta la limitación de los recursos ya que no son infinitos y así ser entregado en el tiempo estipulado o en el nuevo acordado con los interesados. La situación descrita anteriormente es conocida en la literatura como **Problema discreto de compensación tiempo-costo (DTCTP)**.

Es importante resaltar que existen diferentes denominaciones para el problema, autores como Clements (2013) define el DTCTP como problema de equilibrio tiempo-costo. Los autores F, W, & Larson (2009) lo definen como problema de compensación entre tiempo y costo, y el Project Management Institute (2013) lo define como compensación balance entre tiempo y costo. Para el desarrollo de la investigación se utilizará el concepto de problema discreto de compensación tiempo-costo.

En este documento se consideran relaciones discretas de tiempo-costo y se aborda el DTCTP con relevancia practica en proyectos de construcción donde se resolverá mediante la aplicación de un algoritmo genético no dominado NSGA-II ya que es un medio para solucionar problemas multiobjetivo (Narváez, López, & Velilla, 2015). El trabajo en contexto comprende los objetivos de minimización de tiempos y costos, donde el algoritmo genético no dominado perteneciente a las metaheurísticas poblacionales halla un conjunto no dominado, denominado frentes de Pareto y propone una serie de soluciones óptimas (Rojas, López, & Muñoz, 2016).

La obra civil escogida donde se solucionará el problema **DTCTP** es el proyecto “Construcción de la Etapa I – Sede Universitaria Zarzal” ya que la obra fue planificada y programada con un plazo de 365 periodos a partir del 1 de octubre del 2015. Ya en la etapa de ejecución y control el proyecto presenta problemas extendiendo la duración de sus actividades y la entrega del mismo, convirtiéndolo en uno más de los proyectos retrasados en Colombia.

Al día 17 del mes de diciembre del 2017 se tiene estipulado por las partes entregar el proyecto en marzo del 2018, por lo tanto, se genera el problema (DTCTP) y se busca solucionar con la aplicación del algoritmo genético no-dominado NSGA-II. También se escoge por la accesibilidad a los datos y la cercanía del área donde se ejecuta.

CAPÍTULO 1

El capítulo 1 aborda los antecedentes del problema DTCTP en los proyectos de construcción, trayendo diferentes situaciones reales en que se ha presentado el problema de compensación tiempo-costo, primero a nivel global (Proyectos alrededor del mundo) concluyendo con los proyectos retrasados y con exceso de costo presentes en la historia de la construcción en Colombia.

Seguidamente se hace un recuento de la importancia que tiene la solución del DTCTP para los gerentes o administradores de proyectos. Se exponen diferentes situaciones en las que es necesario acelerar la terminación del proyecto y los beneficios que puede traer a las partes involucradas.

Finalmente se adentra en lo que son las herramientas, técnicas y métodos que se involucran en el desarrollo y solución del problema DTCTP, determinando criterios para la modelación matemática.

1. 1 PROBLEMA

1.1.1 Antecedentes. Los proyectos por su naturaleza de incertidumbre y complejidad tienden a presentar problemas durante la ejecución, problemas que se traducen en costos que exceden los límites presupuestarios y tiempos de finalización que van más allá de lo establecido inicialmente. Esto ha sido particularmente notable en los grandes proyectos de construcción, donde los excesos de costos y los retrasos de tiempo se han considerado una ocurrencia común (Abderisak, Josephson, & Göran, 2015).

La necesidad de reducir la duración del proyecto se genera a partir de razones como: fechas de duración impuestas, consideraciones de tiempo al mercado, contratos de incentivos, necesidades de recursos clave, gastos indirectos elevados o tan sólo retrasos imprevistos. Estas situaciones son muy comunes en la práctica y se les conoce como decisiones de concesión costo y tiempo (Gray & Larson, 2009). Los proyectos de construcción tienden a tener una mala reputación por exceso de tiempo y costos excesivos. En un estudio se encontró que de 309 proyectos de construcción Australianos realizados durante los años 1964-1967, solo 37 proyectos (12%) alcanzaron sus tiempos de finalización estimados (Ahsan & Gunawan, 2010). La Comisión Mundial de Represas (WCD) realizó una investigación sobre 99 proyectos grandes e informó que solo 50 de estos proyectos finalizaron a su debido tiempo, 30% de ellos tienen 1-2 años de retraso y 20% tienen más de 2 años de retraso (4 de los proyectos tienen más de 10 años de retraso) (Shahriari, 2016). En Arabia Saudita, se encontraron que solo el 30% de los proyectos de construcción se completaron dentro de las fechas de finalización programadas y que el desbordamiento de tiempo promedio estuvo entre el 10% y el 30% (Sambasivan & Soon, 2007).

En los grandes proyectos de construcción pública, donde los excesos de costos y los retrasos de tiempo se han considerado una ocurrencia común y en mayor grado se presenta en los países en desarrollo donde a pesar de ser proyectos a menor escala, la baja planeación, programación y control hacen que el nivel de costos y tiempo excedan lo previsto. Colombia no es la excepción y en las últimas décadas con el auge de las megas construcciones se ha evidenciado notablemente el problema. Se señala que para el 2016, las obras inconclusas en Colombia tienen en peligro la inversión de, al menos, 1,3 billones de pesos (Dinero, 2016). Son 83 las construcciones en todo el país que durante años han estado sumidas en atrasos e irregularidades. Proyectos insignia como el Túnel de la línea que, de acuerdo con el contrato adjudicado en abril de 2008, la obra debía ser entregada en abril de 2013 lo que significa que a la fecha hay un retraso de 4,5 años (El tiempo, 2016).

1.1.2 Planteamiento. Al hablar de proyectos imprescindiblemente se incurre en demoras o retrasos en sus actividades, situaciones que se generan dependiendo de elementos del entorno como ambientales, sociales, políticos y otros generados por factores internos como los financieros. Se puede presentar situaciones donde surge la necesidad de acelerar las actividades por causas de retrasos en su ejecución o simplemente los interesados llegan a un nuevo acuerdo de cierre de obra.

En obras de construcción la problemática de reducir el tiempo del proyecto ocurre cuando los retrasos imprevistos, como un clima adverso, fallas de diseño y descomposturas de equipo, ocasionan demoras sustanciales a la mitad del proyecto. Por lo general, ponerse al día en el programa requiere comprimir el tiempo en algunas de las actividades críticas. La disminución del tiempo de una actividad crítica en un proyecto se puede hacer, pero casi siempre ocasiona un costo directo más elevado, así el administrador enfrenta un problema de decisión entre costo y tiempo. Las situaciones de costo y tiempo se enfocan en la reducción de la ruta crítica que determina la fecha de terminación del proyecto.

1.1.3 Formulación del problema.

¿Cómo la aceleración de proyectos en obras de construcción posibilita la terminación del proyecto en el tiempo acordado o en el nuevo sugerido por los interesados, reduciendo el tiempo de terminación de actividades con la mínima utilización de los recursos?

1. 2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo general.

Aplicar un modelo matemático que determine los tiempos y costos eficientes para reducir la terminación de un proyecto en una obra de construcción en el Valle del Cauca, dando solución al problema discreto de compensación tiempo-costos (DTCTP).

1.2.2 Objetivos específicos.

- Investigar sobre la problemática del DTCTP y la variedad de formulaciones que se han realizado para abordar el problema, y así determinar los elementos de la herramienta que mejor se ajusta a las condiciones del proyecto objeto de estudio.
- Contextualizar el sector de la construcción en el Norte del Valle del Cauca durante el periodo 2018.
- Definir un modelo matemático con sus respectivos criterios para los datos de entrada y correspondiente análisis de resultados.

1.3 JUSTIFICACIÓN

Un proyecto se planifica, programa, se estiman sus costos y se controla con el fin de cumplir los objetivos propuestos, pero en la mayoría de los casos se presenta una de las siguientes problemáticas: escenarios en que la programación de las actividades no se ejecuta respecto a lo planeado y hace que el proyecto exceda su tiempo de terminación, o que los directivos pueden verse obligados a que el proyecto sea entregado en tiempos inferiores a los planeados que puede darse por ejemplo, cuando se quiere lanzar al mercado un producto más rápido que la competencia. Debido a la magnitud y frecuencia de estos excesos, han llegado a representar un riesgo financiero significativo tanto para los clientes como para los contratistas, además del impacto que se ejerce sobre la sostenibilidad del proyecto (Abderisak, Josephson, Goran, 2015). En este sentido para el propietario la demora significa la pérdida de ingresos debido a la falta de instalaciones de producción y espacio rentable o la dependencia de las instalaciones actuales. En algunos casos, para el contratista, la demora significa costos indirectos más altos debido a un período de trabajo más prolongado, mayores costos de materiales a través de la inflación y debido a los aumentos en los costos laborales (Assaf & Al-Hejji, 2006).

Los anteriores argumentos son la justificación para llevar a cabo esta investigación que pretende con ayuda de la literatura consultada, aplicar un modelo matemático para solucionar el problema discreto de compensación tiempo-costo (DTCTP) que se ajuste a las condiciones y características de los proyectos de construcción desarrollados en la región del Valle del Cauca. También, la Universidad del Valle propende por generar, aplicar y difundir conocimiento que aporte al crecimiento económico-social de la región y del País a través de la investigación, motivo agrado para adentrar en la investigación de un área tan importante como es la de gestión de proyectos.

1.4 MARCO DE ANTECEDENTES

Según Shahriari (2016) el problema de compensación de tiempo-costo es uno de los problemas más importantes y aplicables en el área de programación de

proyectos. Por ende, es necesario aplicarse cuando surgen factores que obligan a gerentes a acelerar el tiempo de terminación de un proyecto, factores como el apuro de ingresar un producto nuevo al mercado, eludir temporadas climáticas desfavorables, compensación de retrasos en las actividades (Gray & Larson, 2009). Su funcionalidad radica como lo describe Shahriari (2016) en asignar recursos adicionales para acortar el tiempo de finalización de las actividades y los gerentes de los proyectos tienen la intención de gastar la menor cantidad de dinero posible y lograr el tiempo acordado.

Mario Vanhoucke (2003) describe que los primeros problemas de compensación tiempo-costo no eran considerados lineales, el objetivo era determinar la duración de la actividad y programar las actividades para minimizar los costos del proyecto, es decir, la suma de la actividad directa y los costos indirectos del proyecto dependientes del tiempo, dentro de una fecha límite especificada para el proyecto. Kelley & Walker (1959) definen el problema como TCTP y lo resuelven de forma lineal, es decir se considera que el costo de los recursos es el mismo en el tiempo.

A medida que progresaron los esfuerzos de investigación y surgieron necesidades prácticas, los investigadores comenzaron a centrarse en el desarrollo de procedimientos para resolver la versión discreta del problema. Este problema discreto de compensación de tiempo-costo (DTCTP) se produce cuando la duración de las actividades del proyecto es discreta, no aumenta en función de la cantidad de un único recurso no renovable comprometido con ellos. Implica la selección de un conjunto de modos de ejecución (las tuplas de costo-tiempo para cada actividad) para lograr un determinado objetivo (Mario Vanhoucke, 2003)

Los autores Kelley & Walker (1959), Mario Vanhoucke (2003), al igual que Hadjiconstantinou & Klerides (2010) describen que el DTCTP es un problema de optimización NP-Hard que según González (2013) es necesario utilizar heurística para llegar a su solución ya que un algoritmo necesitaría un tiempo de máquina y recursos de computo exagerados. Como resultado de su aplicabilidad se obtendría variedad de soluciones óptimas. En 1967 el problema DTCTP es resuelto por un problema de enteros mixtos (Hadjiconstantinou & Klerides, 2010), donde en sus resultados determinan la no confiabilidad de las soluciones.

Ya con antecedentes del problema, surge la investigación de Tavares (1990) con la descomposición de red y en 1992 se obtienen resultados utilizando algoritmos híbridos (De, Dunne, Ghosh, & Wells, 1997). Con el análisis de sus resultados sostienen que cualquier algoritmo de solución exacta requieren una complejidad de tiempo exponencial lo cual puede ser solucionado con heurísticas que arrojan soluciones óptimas en general para el DTCTP. También exponen entre sus recomendaciones utilizar para las próximas investigaciones heurísticas genéricas basadas en inteligencia artificial como algoritmos de búsqueda genética que han sido recientemente utilizados para resolver problemas multicriterio.

Son las recomendaciones anteriores las que sirvieron como base para hallar las investigaciones que se tuvieron en cuenta para el desarrollo del modelo de la

investigación planteada, ya que en la vida real se presentan proyectos con grandes números de actividades y con múltiples objetivos a cumplir, comúnmente llamado problemas multicriterio. Ejemplo la reducción del tiempo del proyecto y del costo final del mismo.

El DTCTP en las investigaciones anteriores fue aplicado para proyectos con un promedio de 20 actividades arrojando buenos resultados, algunos con grandes consumos de tiempo y recursos de máquina. Sin embargo, las últimas publicaciones de investigadores solucionan el problema DTCTP con un promedio de 500 actividades. Kaveh & Mahdavi (2015) aplicó metaheurísticas con algoritmos de búsqueda, resultados razonables en consumo de recursos y tiempo de máquina. Shahriari (2016) menciona que los autores Ke, Ma, & Chen (2012) proponen un algoritmo inteligente que combina simulaciones estocásticas y algoritmos genéticos (GA), donde la técnica de simulación se emplea para estimar funciones aleatorias y tomar decisiones y el GA es utilizado para hallar horarios óptimos, estos dos criterios problema son solucionados con el algoritmo genético no dominado NSGA-II en la investigación de Shahriari (2016).

El algoritmo genético NSGA-II para la solución general del problema DTCTP arroja frentes de Pareto con variedad de soluciones óptimas para los tomadores de decisiones en los proyectos, según el presupuesto disponible y tiempo apropiado para el proyecto. También se puede considerar el valor del dinero en el tiempo (Shahriari, 2016). De los autores abordados se destacó la solución del problema DTCTP por medio del algoritmo genético no dominado NSGA-II ya que se le pueden agregar suposiciones reales de las situaciones presentadas en los proyectos y funciona con un consumo de recursos y tiempo máquina eficiente, por ende, fue utilizado en la presente investigación.

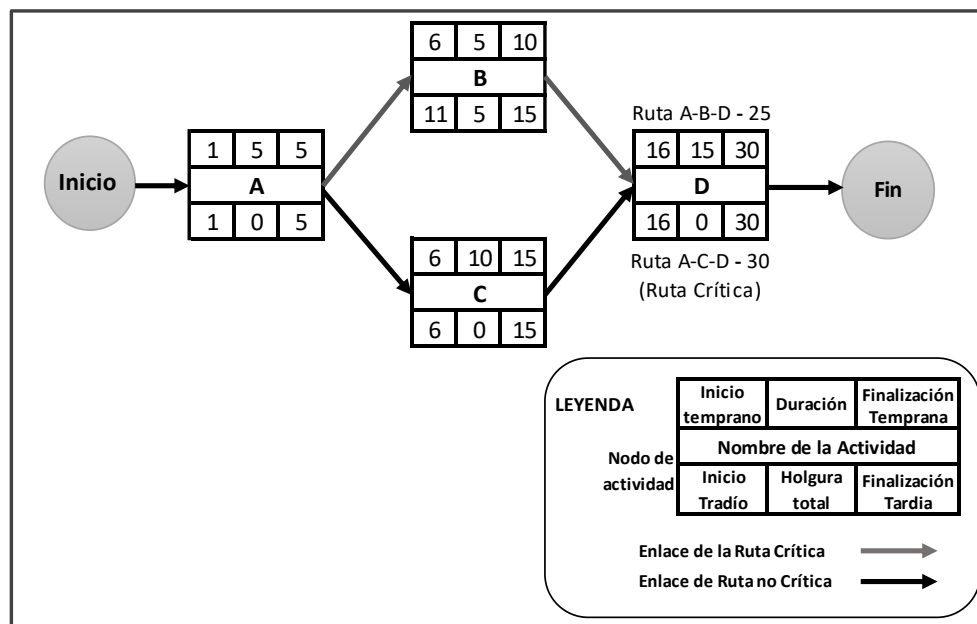
1.5 MARCO TEÓRICO

En esta sección del Capítulo 1 se describió los principios y herramientas utilizados para la comprensión y solución del problema propuesto en la investigación (DTCTP). Inicialmente se habla de la técnica del Método de la ruta crítica (CPM) que representa una visión general del proyecto y que sirve como base para determinar los tiempos, costos y precedencias de actividades, factores relevantes para la modelación matemática. Seguidamente se introdujo en la temática de algoritmos, donde se hace una descripción desglosada de la computación evolutiva, iniciando con una descripción sucinta de algoritmos evolutivos para adentrar más detalladamente en algoritmos genéticos, algoritmos genéticos multiobjetivo y finalmente la descripción del funcionamiento del algoritmo genético no dominado NSGA-II que fue por las condiciones de complejidad del problema DTCTP el algoritmo utilizado para su solución.

- **Método de la Ruta Crítica (CPM).** Es un método utilizado para estimar la mínima duración del proyecto y determinar el nivel de flexibilidad en la programación de los caminos de red lógicos dentro del cronograma. Esta técnica de análisis de la

red del cronograma calcula las fechas de inicio y finalización, tempranas y tardías, para todas las actividades, sin tener en cuenta las limitaciones de recursos, y realiza un análisis que recorre hacia adelante y hacia atrás toda la red del cronograma (Project Management Institute, 2013). La figura 1 presenta un ejemplo donde el camino más largo incluye las actividades A, C y D, y por lo tanto la secuencia A-C-D constituye la ruta crítica.

Figura 1. Ejemplo de Método de la Ruta Crítica



Elaboración propia

Fuente: Project Management Institute (2013).

- **Algoritmos Evolutivos.** Recientemente los algoritmos evolutivos se han encontrado muy útiles para resolver problemas multiobjetivo, puesto que pueden lidiar simultáneamente con un conjunto de soluciones posibles (denominada “población”), y de esta forma permitir encontrar varios individuos del conjunto de óptimos de Pareto en una sola ejecución, contrario al caso de las técnicas clásicas de programación matemática (Santana & Coello, 2006)

Es posible identificar, dentro de los algoritmos evolutivos o computación evolutiva, tres paradigmas principales, como lo son la Programación evolutiva, Estrategia Evolutiva y los Algoritmos Genéticos (Santana & Coello, 2006). El presente trabajo hace énfasis en los Algoritmos genéticos.

- **Algoritmos genéticos.** Los algoritmos genéticos son métodos adaptativos que pueden usarse para resolver problemas de búsqueda y optimización, están basados en el proceso genético de los organismos vivos.

El proceso se inicia generando, en forma aleatoria, un conjunto de vectores o cadenas (cromosoma) conocidos como individuos, que representan una muestra de

la población total de las posibles soluciones. Al conjunto de estos individuos se le conoce como población. Cada uno de estos individuos tienen una característica propia y es relacionada con el valor de la función objetivo, el cual se llama fitness, aptitud o calidad de la cadena (Cuartas, 2009)

Este algoritmo usa los operadores de cruzamiento, mutación y la selección probabilística, siendo el cruzamiento el operador principal (Santana & Coello, 2006). Se describen brevemente a continuación.

Selección. La operación de selección escoge de la población actual (sea inicial o no) las alternativas que presenten mayor valor de aptitud para, a partir de estas, crear nuevos individuos y potencializar así sus características dentro de las nuevas poblaciones. Para ilustrar el proceso de este operador se presenta el Ejemplo 1:

Ejemplo 1. Se tiene una población de cuatro individuos, con la siguiente representación binaria y el siguiente valor de aptitud.

Figura 2. Aptitud de cromosomas

	Cadena	Aptitud
1	110100	220
2	011010	140
3	111001	315
4	001101	42

Fuente: Elaboración propia

Baraja los individuos de la población.

Figura 3. Selección probabilística de Cromosomas

	Cadena	Aptitud	Barajar
1	110100	220	3
2	011010	140	1
3	111001	315	4
4	001101	42	2

Fuente: Elaboración propia

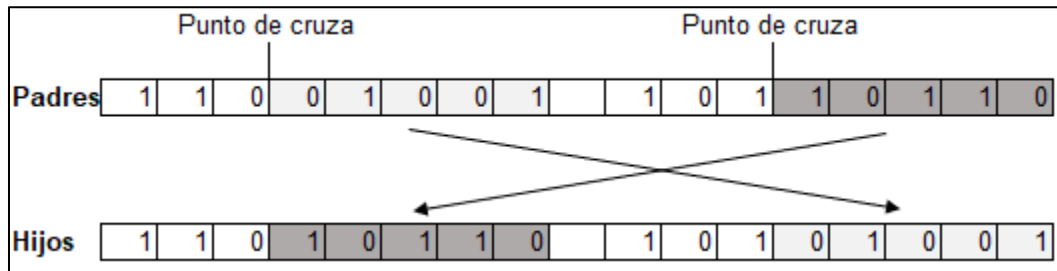
Los individuos p para competir por ser padres, vienen dados generalmente en parejas, quedando en el ejemplo: (1)(3) y (4)(2). La comparación se hace con base al valor de aptitud, siendo el ganador (primer padre) quien tiene el mayor valor. Continuando con el ejemplo los individuos (3) y (2) son los ganadores.

Se baraja la población p veces para seleccionar N padres, donde N es el tamaño de la población.

Cruzamiento. Este es un proceso de creación de nuevos individuos que simula el cruzamiento (intercambio genético entre pares de individuos (llamados padres) con muy alto valor de aptitud), entre dos cromosomas en un sistema biológico. Consiste

en tomar dos cadenas de cromosomas o individuos e intercambia segmentos (genes), de ellos. Este es el operador más importante en un algoritmo genético y trabaja como un operador de explotación, es decir, cruza los individuos con el fin de concentrar su búsqueda en la misma zona. Esta operación se ilustra en la Figura 4.

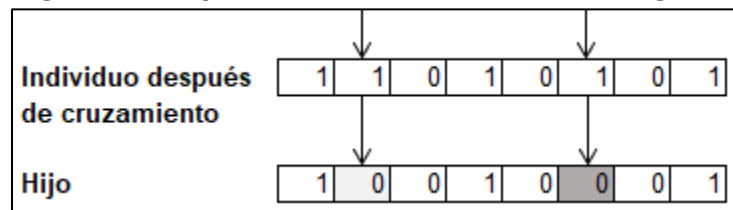
Figura 4. Representación de Cruzamiento en un punto



Fuente: Elaboración propia

Mutación. En los algoritmos genéticos, este operador se utiliza con menor frecuencia en comparación con el operador de cruzamiento, es un operador de exploración puesto que le permite al algoritmo explorar en otras regiones, ayudándole muchas veces a salir de óptimos locales. La Mutación consiste en cambiar algunos valores de los genes, elegidos aleatoriamente, de los individuos obtenidos después del cruzamiento, así, si el valor del gen escogido es uno, se cambia a cero y viceversa como se muestra en la Figura 5.

Figura 5. Representación de Mutación de genes

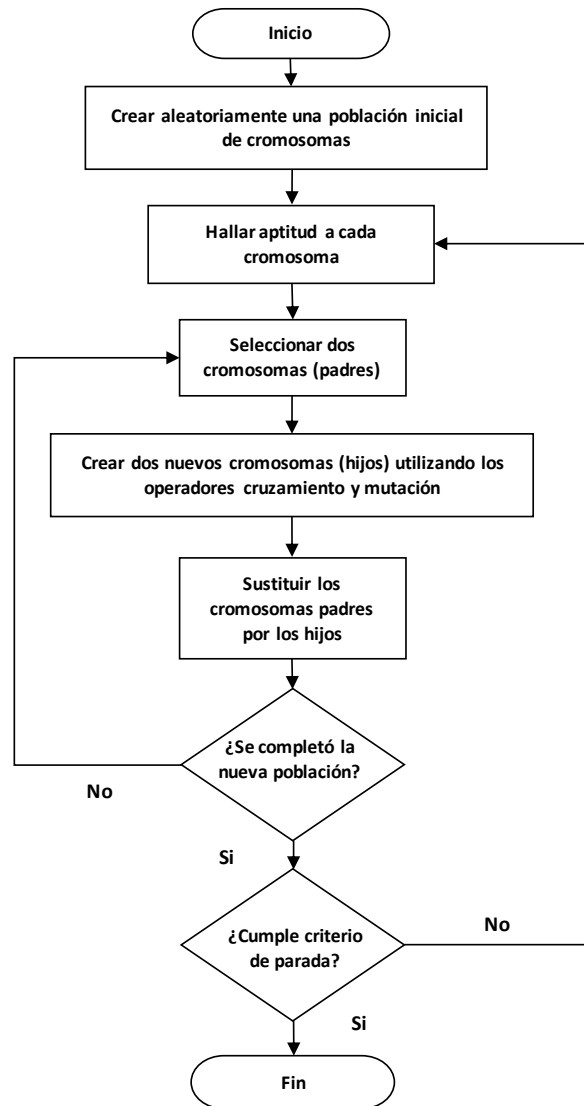


Fuente: Elaboración propia

Los individuos productos del cruzamiento y mutación de los padres son llamados hijos y remplazan a los padres en la nueva población o generación (Cuartas, 2009). En la Figura 6 se representa el proceso de un algoritmo genético.

- **Algoritmo genético multiobjetivo.** La mayor parte de los problemas de optimización del mundo real son naturalmente multiobjetivo. Suelen tener dos o más funciones objetivo que deben satisfacerse simultáneamente y que posiblemente están en conflicto entre sí (Santana & Coello, 2006). En las últimas décadas se ha incrementado el uso de los algoritmos genéticos para resolver problemas multiobjetivo, gracias a su fortaleza de poder trabajar simultáneamente con un conjunto de posibles soluciones cada vez más eficientes y poder obtener resultados satisfactorios. Dicho conjunto es llamado conjunto Pareto-óptimo y su imagen en el espacio objetivo es denominado Frente de Pareto.

Figura 6. Representación del proceso de un Algoritmo Genético



Fuente: Cuartas (2009).

El problema de optimización evolutiva multiobjetivo (OEM) general puede formularse como: Encontrar el vector $\vec{x} = [x_1, x_2, \dots, x_n]$ que satisfaga las m restricciones de desigualdad:

$$g_i(\vec{x}) \geq 0 \quad i = 1, 2, \dots, m$$

Las p restricciones de igualdad,

$$h_i(\vec{x}) = 0 \quad i = 1, 2, \dots, p$$

Y que optimice,

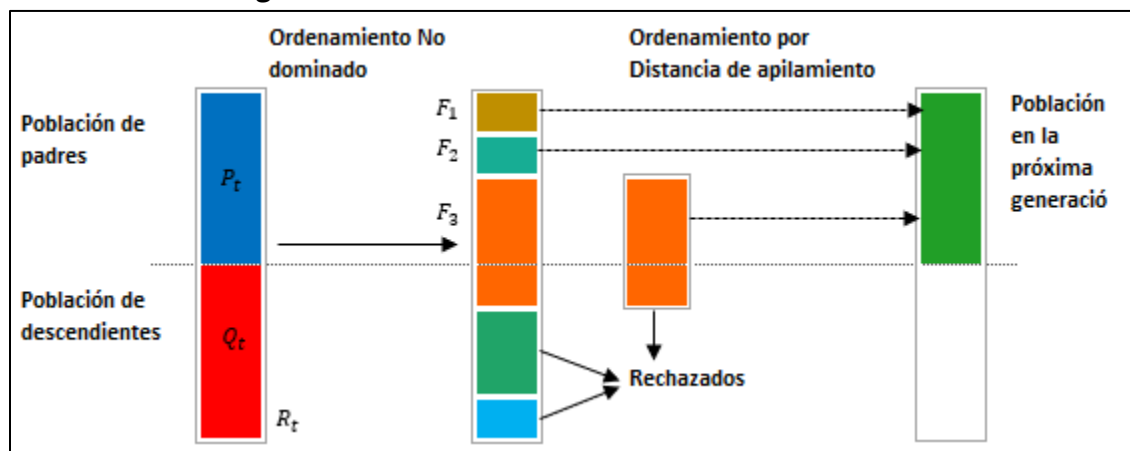
$$\vec{f}(\vec{x}) = [f_1(\vec{x}), f_2(\vec{x}), \dots, f_k(\vec{x})]$$

La literatura actual reporta un gran número de Algoritmos Evolutivos para Optimización Multiobjetivo. En el presente trabajo de investigación se remitirá al Algoritmo Genético No-Dominado II (NSGA-II), con el cual se dará solución al modelo presentado, que consiste en un problema multiobjetivo que busca minimizar el tiempo y el costo total del proyecto.

- **NSGA-II.** El algoritmo genético de clasificación no dominado (NSGA-II) es uno de los algoritmos multiobjetivo más eficientes y famosos. Demostró su utilidad en problemas de múltiples objetivos (Shahriari, 2016). En el caso de problemas multiobjetivo se debe tener en cuenta el concepto de no dominancia. Se dice que una solución X_1 domina a otra solución X_2 cuando: a) la solución X_1 no es peor que X_2 en ninguno de los objetivos y b) la solución X_1 es estrictamente mejor que X_2 en al menos un objetivo. Si alguna de estas dos condiciones no se cumple, entonces X_1 no domina a X_2 .

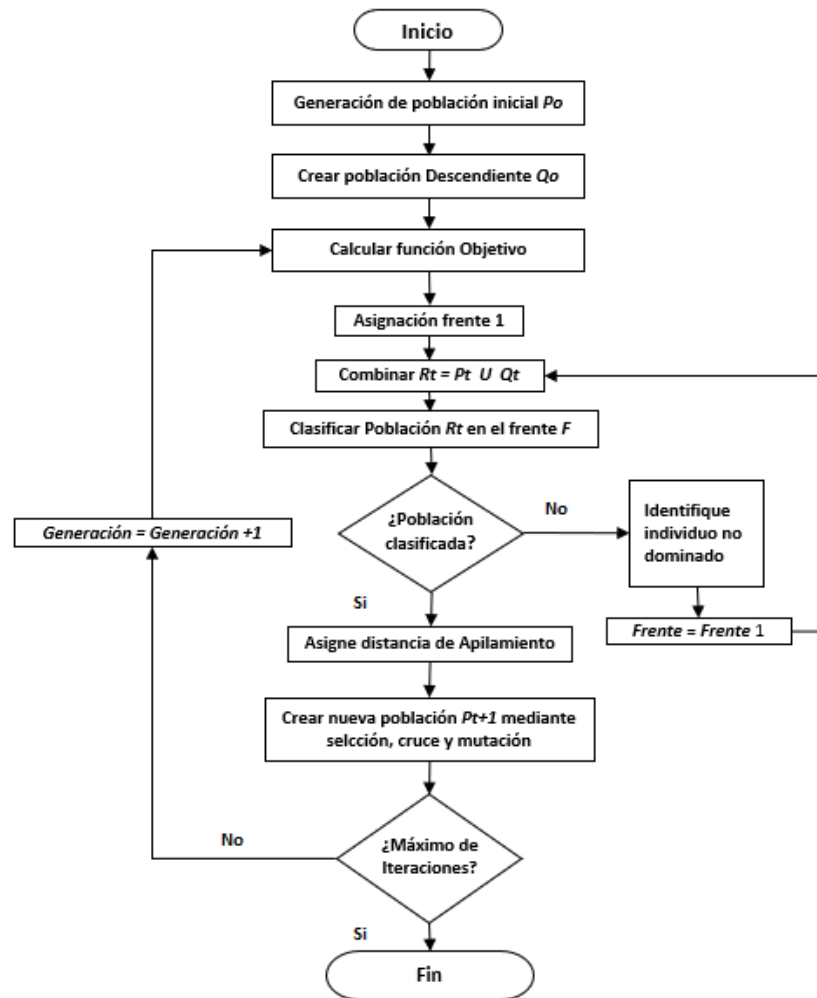
En este algoritmo, la población descendiente Q_t (tamaño N) es creada en primera instancia usando la población de padres P_t (tamaño N). Después de esto, las dos poblaciones son combinadas para formar R_t de tamaño $2N$. Después de lo anterior, mediante un ordenamiento no dominado se clasifica la población R_t en diferentes frentes de Pareto. Aunque esto requiere un mayor esfuerzo, se justifica por el hecho de permitir una verificación global de dominancia entre la población de padres y descendientes. Una vez el proceso de ordenamiento no dominado ha finalizado, la nueva población es generada a partir de las configuraciones de los frentes no dominados. Esta nueva población empieza a ser construida con el mejor frente no dominado (F_1), continúa con las soluciones del segundo frente (F_2), tercero (F_3) y así sucesivamente. Como la población R_t es de tamaño $2N$, y solamente existen N configuraciones que conforman la población descendiente, no todas las configuraciones de los frentes pertenecientes a la población R_t podrán ser acomodados en la nueva población. Aquellos frentes que no pueden ser acomodados desaparecen (Correa, Bolaños, & Molina, 2008). La Figura 7 muestra el proceso de selección de individuos del NSGA-II.

Figura 7. Selección de individuos del NSGA II



Fuente: Shahriari (2016).

Figura 8. Diagrama de Flujo del NSGA-II



Fuente: Rojas (2016).

El algoritmo implementado parte de una población inicial generada de forma aleatoria P_0 . Una vez se tiene la población inicial se genera la población descendiente Q_0 (esta se denota como Q_t para futuras generaciones). Posteriormente se calcula la función objetivo y se hace la clasificación de la población por dominancia. Posteriormente se aplican los operadores de selección, cruce y mutación. Para mantener la diversidad de la población se implementa el elitismo. Esto es, en todas las operaciones de selección, la densidad de la población en la vecindad de un individuo se utiliza como medida secundaria de adaptación. Cada vez que se comparan dos individuos, se emplea el comparador que permite saber cuál está mejor adaptado. Se prefiere el individuo que pertenece al menor frente, y si ambos pertenecen al mismo frente, se prefiere la solución con menos soluciones a su alrededor (Rojas, López, & Muñoz, 2016). En la Figura 8 se ilustra el diagrama de flujo del NSGA-II implementado.

CAPÍTULO 2

Para dar cumplimiento al objetivo de Investigación sobre la problemática del DTCTP y la variedad de formulaciones que se han realizado dando respuestas factibles al problema. Inicialmente se hace una descripción general de las tres versiones del DTCTP que se clasifican según su función objetivo. A partir de las tres versiones se detalla cómo se encuentra clasificado el problema de compensación tiempo-costo discreto (DTCTP), que de acuerdo con el comportamiento de las variables tiempo-costo, pueden ser estocásticas o determinísticas. También se hace la clasificación dependiendo el número de objetivos de cada investigación. Para cada caso se mencionan los criterios y herramientas que fueron utilizadas en la solución. En el final del capítulo se hace un acercamiento a la elección del método a emplear en la presente investigación.

2.1 MÉTODOS Y CRITERIOS DTCTP

En el marco de antecedentes se mencionó que en la gestión de los proyectos la terminación del proyecto puede acortarse asignando más recursos a actividades críticas. La cantidad de recursos suele ser discreta, como lo es el número de trabajadores, máquinas, etc. Estos recursos generalmente se tratan como recursos no renovables y son medidos en unidades de costo, lo que hace posible el surgimiento del problema de compensación tiempo-costo discreto, más conocido como DTCTP (De et al., 1997).

Según Vanhoucke (2003) el DTCTP es un problema NP-hard como consecuencia de sus múltiples nodos en la red del proyecto, lo que ha llevado a la ineficiencia en su solución por medio de métodos exactos, arrojando resultados con problemas de consumo de recursos en máquina y con restricciones en el número de actividades. A partir de ello Shi, Wang, Tang, & Nie (2000) propone que el DTCTP debe ser solucionado con heurísticas y metaheurísticas que despliegan resultados razonables en tiempo y considerando un mayor número de actividades. Dentro de los métodos exactos se pueden mencionar: Programación dinámica, enumeración de algoritmo y algoritmo de ramificación (Vanhoucke, Demeulemeester, & Herroelen, 2002). Ya en los métodos heurísticos y metaheurísticos existen Algoritmos genéticos, algoritmos basados en Lagrange, simulación Montecarlo, LPmetric (Li, Xu, Xiong, & Liu, 2015) y (Shahriari, 2016).

En general existen tres versiones del DTCTP (Hazir, 2008). Li, Xu, Xiong, & Liu (2015) argumentan que en términos del tipo de función objetivo estas tres versiones del DTCTP se clasifican en: El Problema de la fecha límite (DTCTP-D), el problema del presupuesto (DTCTP-B) y el problema de la curva de compensación de tiempo-costo (DTCTP-C), tres versiones que se solucionan tanto en métodos exactos como heurísticos.

En el DTCTP-D, dado un conjunto de modos y una fecha límite del proyecto, el objetivo es minimizar el costo total del proyecto especificando para cada actividad

un modo de ejecución. En el DTCTP-B, se da un presupuesto del proyecto y el objetivo es determinar los modos que minimizan el makespan o tiempo de terminación del proyecto. En el DTCTP-C, el objetivo es determinar la curva de Pareto que minimiza el costo del proyecto y el makespan simultáneamente.

En situaciones reales de un proyecto se presentan dos escenarios para la solución del DTCTP: El determinístico y el estocástico. En la familia de determinísticos el tiempo y costo de cada actividad se conocen como modos (Hazir, 2008). Están plenamente definidos para toda la planeación y programación del proyecto, los datos se establecen con base en criterios de expertos y datos históricos. Lo contrario sucede cuando los valores de las variables tiempo-costo no son determinadas con certeza y da paso a variables con incertidumbre, que se puede ver reflejada según Ballestin & Leus (2009) en escasez de maquinaria, entrega retrasada de materiales, ausencia de trabajadores, ocasionando directamente problemas de retraso en las actividades programadas, en el alcance del proyecto y costo del mismo, surgiendo así el DTCTP bajo incertidumbre o estocástico. Los estudios que se basan en modelos determinísticos y modelos estocásticos del DTCTP se tratarán en las siguientes secciones.

2.2 DTCTP DETERMINÍSTICOS

La mayor parte de la literatura estudia el modelo determinista del DTCTP, donde asume información completa y precisa sobre el proyecto. Los estudios han abordado diferentes variaciones del problema junto con diferentes enfoques de solución, para métodos exactos: Programación dinámica, enumeración de algoritmo y algoritmo de ramificación según Demeulemeester, Herroelen, & Elmaghraby (1996). Para métodos heurísticos o aproximados: Algoritmos genéticos, algoritmos basados en Lagrange, simulación Montecarlo, LPmetric, algoritmos de aproximación (Li et al., 2015) y (Shahriari, 2016).

2.1.1 Modelos Mono-objetivo.

La mayoría de las investigaciones han enfatizado en modelos de un solo objetivo de DTCTP en comparación con los modelos multiobjetivo. En esta sección se mencionarán los modelos matemáticos mono-objetivo con método de solución exacta que busca una solución exacta y método de solución heurística que buscan soluciones cuasi óptimas.

Para métodos de solución exacta, Demeulemeester et al. (1996) propuso dos soluciones para las tres versiones diferentes del problema (DTCTP-A, DTCTP-B, DTCTPC) basados en lógica de programación dinámica, resolviendo el DTCTP en redes deterministas de actividad en arco de tipo CPM en proyectos de diferentes tamaños de 14 y 45 actividades. El primer algoritmo busca el número mínimo de reducciones necesarias para transformar una red general en una red serie paralela. El segundo algoritmo minimiza el número estimado de posibilidades que deben considerarse durante el procedimiento de solución. Ambos procedimientos fueron

programados en C++ y se probaron en conjuntos de redes representativas para demostrar su desempeño e indicar las circunstancias en las que cualquiera de los algoritmos funciona mejor. En sus conclusiones informan que obtuvieron dificultades por el número de actividades. Los resultados mejoraron en la investigación de Vanhoucke et al. (2002) usando ramificación y enlace (BAB) para resolver de manera óptima el DTCTP con restricciones de cambio de tiempo (DTCTPTSC), que es una variante del problema de la fecha límite (DTCTP-D), donde resolvieron instancias de red desde 10 a 30 actividades, fue modelado en C++ y dos funciones objetivo más se tomaron como restricciones. Sin embargo Hadjiconstantinou & Klerides (2010) presentan una solución basada en versiones de plazos presupuestos y compensaciones del DTCTP. La estrategia de la solución se basa en un algoritmo mejorado de plano de corte exacto, mejorado con técnicas de aceleración, resolviendo el DTCTP para instancias de red de diferentes tamaños, en este caso fueron probadas hasta 136 actividades. La investigación de Değirmenci & Azizoğlu (2013), propuso un algoritmo heurístico y de optimización basado en la técnica de solución de ramificación y enlace (BAB). Los autores derivaron algunos mecanismos para reducir el tamaño del problema antes de resolverlo mediante la técnica de solución basada en BAB, y los resultados fueron comparados con los del algoritmo heurístico, se modeló con redes de tamaños que variaron entre 30 y 35 actividades.

Para métodos de solución heurística o aproximada se trae a discusión los más representativos en la literatura referente al proyecto de investigación. Skutella (1998) propuso algoritmos de aproximación para los problemas de presupuesto y curva de tiempo-costo, es decir, dado un presupuesto fijo, se debe encontrar una ruta más corta para la terminación del Proyecto. Para el problema de presupuesto expone un algoritmo de aproximación con una garantía de rendimiento de $3/2$, cuando las duraciones de las actividades factibles son 0, 1 o 2. Los resultados se extienden a un algoritmo de aproximación con garantía de rendimiento $O(\log I)$, donde I es la relación entre la duración máxima y la duración mínima distinta de cero. Para el problema de la curva de tiempo-costo (DTCTP-C), propuso algoritmos de aproximación con un factor de error constante. Vanhoucke et al. (2002) desarrolló un procedimiento heurístico que se basa en el procedimiento de solución de Demeulemeester, Reyck, & Herroelen (1998) para resolver el DTCTP con restricciones de cambio de tiempo (DTCTPTSC). El estudio de Akkan (2005) propuso otro enfoque basado en una solución heurística para resolver la versión de plazo límite (DTCTP-D) de 20 hasta 30 actividades. En este estudio los autores propusieron enfoques de solución heurística que proporcionan los límites superior e inferior mediante el uso de la técnica de generación de columnas a través de técnicas de descomposición de la red para acelerar el proceso de resolución de grandes instancias de red del problema. La estrategia de solución se evaluó resolviendo dos bancos de pruebas. La prueba N°1 fue de 136 actividades y la prueba N°2 con 42. Buscando una mayor eficiencia en tiempo de máquina se utilizó un algoritmo genético en el trabajo de Wuliang & Chengen (2009) para resolver el DTCTP (MRC-DTCTP) de recursos multimodo, que es una versión modificada del DTCTP que tiene en cuenta los recursos renovables. El estudio propuso mediante el algoritmo mejorado resolver las tres versiones del DTCTP: fecha límite (DTCTP-

D), presupuesto (DTCTP-B) y curva de costo-tiempo (DTCTP). Los resultados se compararon con el algoritmo de ramificación y unión. Hafizoğlu & Azizoğlu (2009) propusieron estrategias de solución adicionales que se basan en el algoritmo BAB y de programación lineal (LPR). Estas estrategias se utilizaron para resolver el problema de la fecha límite del DTCTP con instancias de red tomadas de la literatura de Akkan (2005). Se puede ir evidenciando que los resultados heurísticos se adaptan más cómodamente a las situaciones reales por el número amplio de actividades, los tamaños de redes mencionadas han estudiado hasta 136 actividades. El trabajo de Anagnostopoulos & Kotsikas (2010) estudió la versión especial del problema de DTCTP, donde se minimizó el costo total, teniendo en cuenta el costo directo e indirecto del proyecto. Consideró situaciones con redes de 100, 200 y 300 actividades. Sonmez & Bettemir (2012) resolvieron el problema de la fecha límite utilizando un algoritmo híbrido que combinó el algoritmo genético (GA) y el algoritmo cuántico (QSA) buscando una solución óptima o cuasi óptima del DTCTP de gran tamaño realista en un tiempo de cálculo razonable. El rendimiento del algoritmo híbrido o metaheurística híbrida se evaluó probándolo en instancias de red de tamaños que varían entre 18 a 630 actividades.

Cabe resaltar que los métodos en discusión aumentaron la capacidad de resolución en pro del número de actividades del proyecto para los modelos mono-objetivos con el avance de las investigaciones.

2.1.2 Modelos multiobjetivo.

En situaciones reales cuando se ejecuta un proyecto se presentan problemas multiobjetivo en la mayoría de los casos. Donde consideran el tiempo, costo, valor presente del dinero y alcances del proyecto. El campo no ha sido muy estudiado y presenta oportunidades para aportar métodos de resolución para este modelo.

Tareghian & Taheri (2006) propuso un modelo multiobjetivo del DTCTP donde optimizó el tiempo, costo y calidad por medio de programación de enteros. Los autores resolvieron los tres objetivos de forma óptima con 45 actividades y representaron su rendimiento computacional mediante ejemplos numéricos. En un estudio posterior los autores, Tareghian & Taheri (2007) retomaron sus objetivos pero utilizaron una meta-heurística para resolver el (DTCQTP). El procedimiento metaheurístico propuesto se basa en la técnica de búsqueda de dispersión electromagnética. El enfoque propuesto se evaluó resolviendo instancias de redes con 20 actividades que se eligieron al azar, las soluciones factibles se combinan y mejoran utilizando mecanismos de atracción y repulsión tomados del electromagnetismo. Ya en el 2010 el estudio Assadipour & Iranmanesh (2010) propuso una meta-heurística multiobjetivo llamada CellDE, que es un algoritmo genético celular híbrido para resolver el DTCQTP (Objetivos de calidad, tiempo y costo discreto). El algoritmo propuesto proporciona a los gerentes de proyecto un conjunto de soluciones no dominadas u óptimas de Pareto que les permite elegir la mejor de acuerdo con sus preferencias. Se emplean tres métricas para evaluar el rendimiento del algoritmo, utilizando la diversidad y la convergencia de los frentes de Pareto logrados. Finalmente se hace una comparación entre CellDE y otra

metaheurística. El algoritmo se evaluó resolviendo problemas de tamaño que varían entre 30 y 120 actividades. Cabe destacar que los autores Assadipour & Iranmanesh (2010) al igual que Shahriari (2016) en su investigación obtuvieron resultados para que en situaciones reales los tomadores de decisión pudiesen escoger los diferentes modos arrojados en función del presupuesto disponible, tiempo adecuado y calidad del proyecto. El autor Shahriari (2016) presenta un modelo matemático de dos objetivos solucionado mediante el algoritmo genético no dominado (NSGA-II), dando solución al problema DTCTP, donde a comparación de los autores anteriores, incluye los parámetros de costos directos e indirectos, considera la función objetivo no lineal y valor presente del dinero, acercándose a situaciones reales. En su desarrollo utiliza 42 actividades de prueba.

2.3 DTCTP PROBABILÍSTICOS O ESTOCÁSTICOS

En la práctica, los proyectos están acompañados de diversas incertidumbres que pueden afectar en gran medida el costo y la duración del proyecto. Estudios recientes han prestado más atención al DTCTP estocástico (SDTCTP), que explica las incertidumbres al considerar el tiempo y el costo de las actividades como variables estocásticas.

Como primeros investigadores en el campo, Gutjahr, Strauss, & Wagner (2000), presentaron un procedimiento estocástico de ramificación y unión para resolver el problema de la fecha límite del DTCTP basándose en el supuesto de que los tiempos de cada actividad son variables aleatorias mutuamente independientes. Laslo (2003) utilizó el método fractal para construir curvas de tiempo-costo para una actividad única de duración estocástica. Ke, Ma, & Ni (2009) usaron la programación restringida por el azar y la programación dependiente del azar para modelar el estocástico DTCTP. Los autores diseñaron un algoritmo inteligente para buscar los cronogramas casi óptimos al tiempo que equilibran la duración y el costo del proyecto. Hadjiconstantinou & Klerides (2010) propusieron un enfoque de programación de enteros estocásticos de dos etapas basado en la trayectoria para decidir cómo y cuándo ejecutar cada actividad minimizando la duración y el costo del proyecto utilizando las duraciones por actividad realizadas.

Los autores Eshtehardian, Afshar, & Abbasnia (2009) fijan dos tipos de incertidumbres: las incertidumbres estadísticas y las incertidumbres no estadísticas. La principal diferencia entre ellas yace en que las incertidumbres estadísticas, el costo y el tiempo de las actividades del proyecto se describen como un número aleatorio con función de densidad de probabilidad definida (PDF) y se necesitan suficientes datos estadísticos, distribuciones de probabilidad para los costos y tiempos de las actividades. Por otro lado, las actividades se acompañan de incertidumbres no estadísticas cuando faltan datos estadísticos confiables. El enfoque probabilístico es efectivo cuando existen incertidumbres estadísticas. Sin embargo, en el caso de incertidumbres no estadísticas, la teoría de conjuntos difusos se utiliza para modelar el problema de la compensación de tiempo-costo estocástico (SDTCTP). Bajo estas circunstancias, algunas investigaciones también

usan valores nominales y sus rangos de variación para indicar parámetros aleatorios, lo que da parámetros de incertidumbre a intervalos (Yin & Wang, 2014).

En el trabajo de Xu, Zheng, Zeng, Wu, & Shen (2012) se desarrolló un algoritmo genético híbrido adaptativo de base difusa para resolver el problema discreto de compensación de tiempo, costo y medio ambiente (DTCETP). El modelo del problema se formuló utilizando la teoría de conjuntos difusos en la que las duraciones de actividad inciertas se modelaron como variables difusas.

2.4 CONCLUSIONES

Analizando los enfoques anteriores y las áreas permisibles para profundizar en investigación del DTCTP, se propone dar solución al problema de intercambio tiempo-costo discreto (DTCTP) utilizando un modelo multiobjetivo determinístico que determine el frente Pareto que minimiza el costo del proyecto y su terminación simultáneamente. Se puede decir que se identifica con la versión DTCTP-C. Al ser un problema NP-hard se utiliza el algoritmo heurístico NSGA-II que en la literatura ha obtenido buenos resultados en tiempo y consumo de recursos de máquina, siendo uno de los más eficientes.

CAPÍTULO 3

Para dar cumplimiento al objetivo contextualización del sector construcción en el Valle del Cauca en el año 2018, se describió jerárquicamente el sector de la construcción donde se trajo a discusión el aporte monetario que genera el sector y las áreas licenciadas otorgadas por los organismos legales para ejecución de obras. La discusión en su punto inicial cubre un aspecto nacional y puntualiza en el área del proyecto objeto de estudio.

El desarrollo del capítulo contextualiza la dinámica del sector de la construcción que es el escenario donde se aplicó el modelo matemático de optimización tiempo-costo. Ayudando a puntualizar criterios relevantes y reales para construir y alimentar el modelo matemático. Terminada la contextualización se observó el comportamiento de los factores macro como son las áreas licenciadas de construcción. Factores que se dinamizan dependiendo las variables tiempo-costo de los proyectos. Para entender las variables anteriores se puede mencionar el número de proyectos terminados y definidos en cierto periodo de tiempo, donde a mayor sea este índice mayor será el aporte al rubro del sector de la construcción, también hay que tener claro que en la ejecución de los proyectos es necesario ser productivos y eficientes en el uso de los recursos para reducir el costo total del proyecto.

Los temas del capítulo se encuentran estructurados por índices donde en su primera categoría se describió las delimitaciones del área de la contextualización, conceptos y aspectos generales. En su segundo nivel está definido el índice de empleabilidad, seguido de áreas licenciadas para ejecución de obras y termina con las conclusiones generales del capítulo.

3.1 CONTEXTUALIZACIÓN DEL SECTOR CONTRUCCIÓN EN EL VALLE DEL CAUCA EN EL AÑO 2018

El Valle del Cauca conformado por 42 municipios aglomerados en zonas según su ubicación, donde el municipio de Zarzal se encuentra localizado en la zona norte que es el área donde se ejecutó la obra de construcción objeto de estudio, por su inmediata cercanía es debido mencionar el municipio de Roldanillo. Se consideran aspectos puntuales de ambos municipios.

Es necesario mencionar que el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE), en su boletín técnico DANE (2018) al igual que Instituto Vasco de Estadística (2017) para diferenciar los tipos de obras de construcción, desagrega el sector construcción en dos rubros. El primero es de construcción de vivienda y edificaciones, mientras que el segundo habla acerca de construcción pesada y obras civiles, este último hace referencia a las obras que buscan satisfacer las necesidades colectivas o públicas de la Nación tales como generación y provisión de agua y energía, telecomunicaciones, transporte entre otras. Siendo el sector de construcción pesada y obras civiles el rubro que acoge la construcción de la obra “Construcción de la Etapa I – Sede Universitaria Zarzal”.

Según Construdata (2015), en la década del 90 el dinamismo del sector de la construcción lo aportaba el rubro de obras civiles, contribuyendo con un 66% de su total, el margen restante era compromiso del rubro de las edificaciones. Sin embargo, para el año 2017 y lo corrido del año 2018 el rubro de mayor importancia es el de las edificaciones. Donde los destinos habitacionales o vivienda es el margen que dinamiza el sector (DANE, 2018).

Para el Valle del Cauca la dinámica del sector de la construcción es una porción que sigue la tendencia de todo el país, el rubro de edificaciones es el margen que aporta desarrollo al sector en la región. Más adelante en el apartado de licencias de construcción se puede constatar con el índice de números de metros licenciados las diferencias notables entre el rubro de obras civiles y sector de edificación en el Valle del Cauca y en los dos municipios antes mencionados.

3.2 EMPLEABILIDAD

El boletín DANE (2018) en términos de empleo menciona que en el trimestre móvil mayo–julio de 2018, el número de ocupados en el total nacional fue 22.5 millones de personas. La Construcción como rama de actividad económica participó con el 6,2% de los ocupados. Respecto al trimestre móvil mayo–julio de 2017, la población ocupada en el total nacional creció 0,4. Para el trimestre móvil mayo–julio de 2018, 1.4 millones de personas estaban ocupadas en la rama de la Construcción, de estos el 88,1% estaban ubicados en las cabeceras (1.2 millones de personas) y el 11,9% (0.16 millones de personas) en centros poblados y rural disperso.

En el trimestre móvil febrero – abril 2018, el número de ocupados en el total nacional fue 22.2 millones de personas. La construcción como rama de actividad económica participó con el 5,9% de los ocupados. Respecto al trimestre móvil febrero – abril 2017, la población ocupada en el total nacional creció 0,2%. Los ocupados en la rama de la construcción crecieron 0,1%. Para el trimestre móvil febrero – abril 2018, 1.3 millones de personas estaban ocupadas en la rama de la construcción, de estos el 87,7% estaban ubicados en las cabeceras (1.1 millones de personas) y el 12,3% (0.16 millones de personas) en centros poblados y rural disperso (DANE, 2018).

En el I semestre de 2018 la tasa de desempleo nacional se ubicó en 10,6%, mientras que en la ciudad de Cali presentó una tasa del 11,5%. Del total de ocupados de Cali 78.184 personas se encuentran en el sector de la construcción, es decir 6% de participación. En el trimestre móvil Abril – junio de 2017 se emplearon 1.354.587 personas en el sector de la construcción a nivel nacional, lo cual representa el 6% del total de personas empleadas en las diferentes actividades económicas del país (22.578.160). En Cali, el nivel de ocupación para el trimestre móvil abril - junio de 2017 fue de 1.230.890 personas, de las cuales el 7% pertenecen al sector constructor de la ciudad, es decir, 80.555 personas. Esto representa un descenso del 1,5% respecto al trimestre móvil inmediatamente anterior y un crecimiento del 3,7% comparado con el mismo periodo de 2016 (Camacol, 2018). Estos niveles de participación de empleabilidad en el rubro construcción en la región son un factor

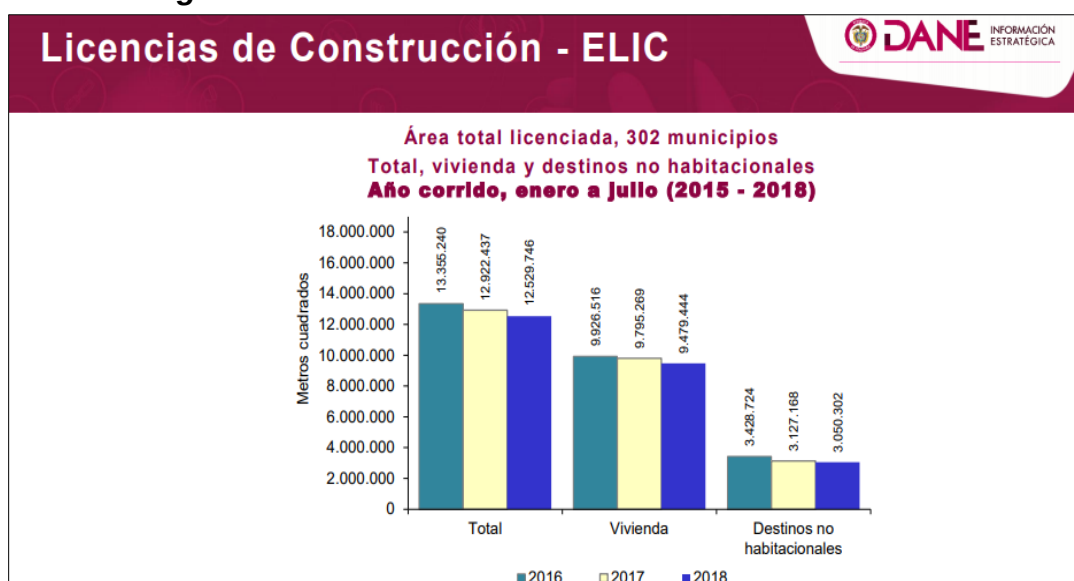
potencial para el desarrollo del presente proyecto, que en la teoría y en la práctica al ser los recursos limitados son una variable importante a tener en cuenta en la aceleración de proyectos.

3.3 LICENCIAS DE CONSTRUCCIÓN

Las licencias de construcción forman parte de un conjunto de instrumentos de control administrativo público, cuyo propósito es controlar coordinadamente el crecimiento y desarrollo de las ciudades, municipios o territorios (DANE, 2018). Por ende, es de importancia para la investigación conocer el número de licencias que se han expedido en el periodo del año en curso, con el fin de extraer criterios de tiempo y área para construir el modelo matemático. También establece el total de área licenciada a nivel nacional, en el departamento y en los municipios en mención.

Las fuentes de información para abordar la caracterización del sector construcción a nivel nacional y departamental fueron: DANE y Camacol. A nivel regional los datos se encontraron en las alcaldías municipales. La figura 9 presenta los datos de área total licenciada en vivienda y destinos no habitacionales del año 2016, 2017 y 2018 en su primer semestre. También se puede visualizar los datos de cada margen individual, recordando que la información es recolectada en m², la gráfica es construida con la base de datos de 302 municipios que alimentan el archivo plano del DANE. La figura 9 corrobora que en el transcurso del año el margen licenciado de vivienda en el rubro de edificaciones ha dinamizado el sector de la construcción a nivel nacional con un área licenciada de 9.479.444 mt² y en el margen de edificaciones no habitacionales comprende el área licenciada de 3.050.302 mt². En su totalidad el área licenciada es de 12.529.746 mt².

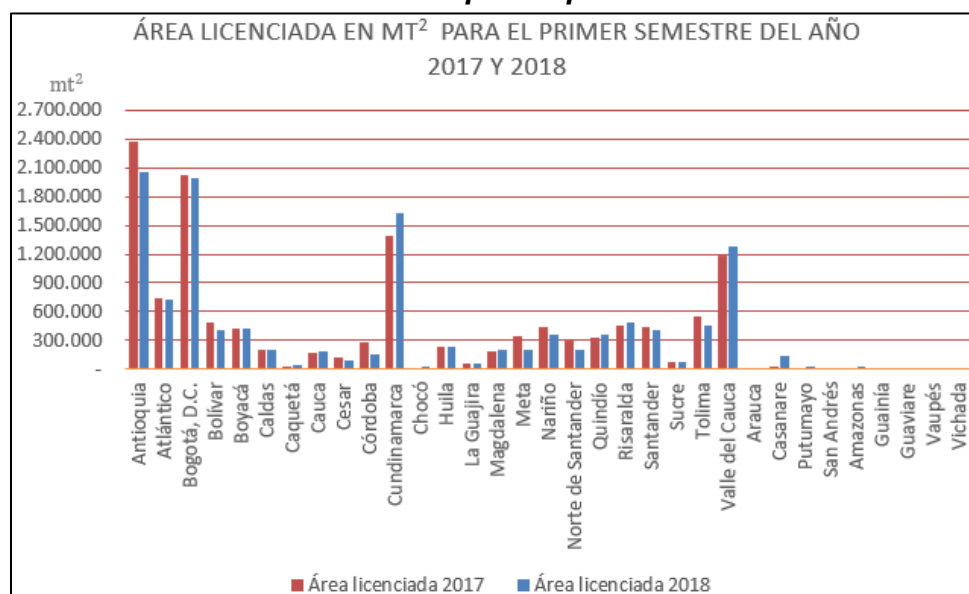
Figura 9. Licencias de construcción a nivel nacional



Fuente: Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE).

3.4.1 Área licenciada en el Valle del Cauca. La información de licencias a nivel departamental se tomó de las estadísticas recopiladas por el DANE. En el primer semestre de 2017 y primer semestre de 2018 el área licenciada para obras civiles y edificaciones en el Valle del Cauca fue de 1.186.956 mt² y 1.285.449 mt², respectivamente (figura 10). Esta última cifra significa que el departamento ocupara el 4 puesto a nivel nacional con mayor área otorgada para edificar.

Figura 10. Área licenciada para construcción de Obras civiles y Edificaciones por Departamento



Elaboración propia

Fuente: Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE).

Haciendo un enfoque en el departamento y por facilidad de acceso a datos verídicos se toma como base la capital del valle del Cauca para describir la dinámica del sector de la construcción en la región, descrito el área licenciada de la capital se mencionará los municipios objeto de estudio con su respectiva información.

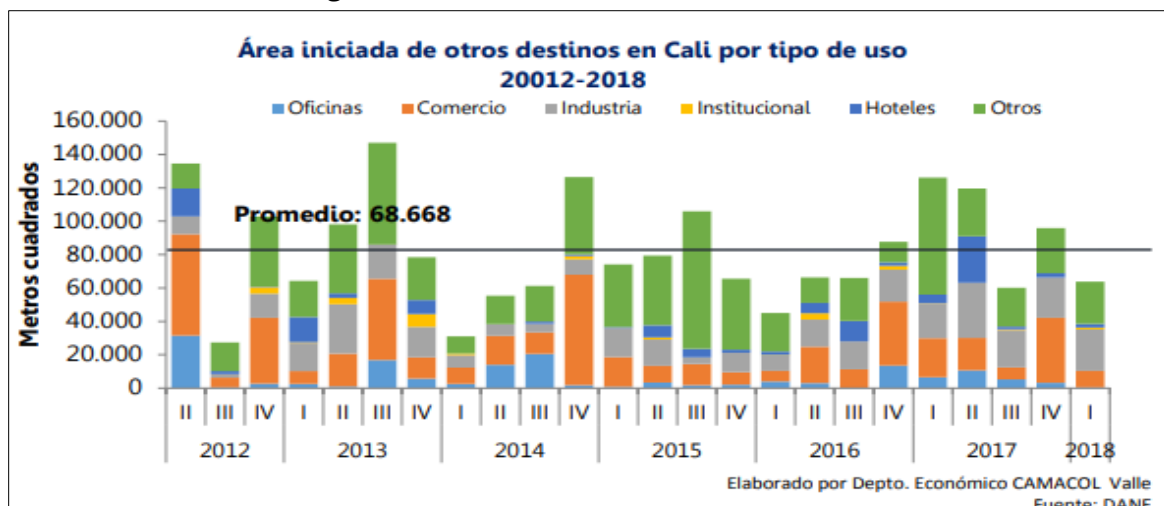
Al igual que a nivel nacional el rubro concerniente a vivienda (VIS, no VIS) es el más representativo del sector de la construcción en el Valle del Cauca. Según Camacol (2018) en su boletín Económico de Julio 2018 precisa que en el I trimestre de 2018 el área urbana iniciada a construir en Cali presentó una tasa de decremento de 0,3% al pasar de 506.818 mt² en el I trimestre del 2017 a 505.129 mt² en el I trimestre de 2018. No obstante, el decrecimiento es parte del problema nacional que se viene presentando en el sector de la construcción, para objeto del estudio, el problema no es discutido, pero si se toma el área licenciada en Cali de 505.129 mt²

En la figura 11 se evidencia que la ciudad de Cali entre el año entre 2012 y 2018, el 79% del total del área iniciada correspondió a la construcción de vivienda, el 21% restante corresponde a destinos no residenciales entre los que se destacan los siguientes: Otros usos no residenciales con una participación de 40%, Industria con

un 39%, Comercio con 15%, Hoteles con 4%, Institucional con 2%, y Oficinas con 1%.

Es preciso mencionar que dentro del promedio de 21% se encuentra la obra Construcción de la Etapa I – Sede Universitaria Zarzal iniciada en el año 2015.

Figura 11. Destinos de área licenciada



Fuente: Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE).

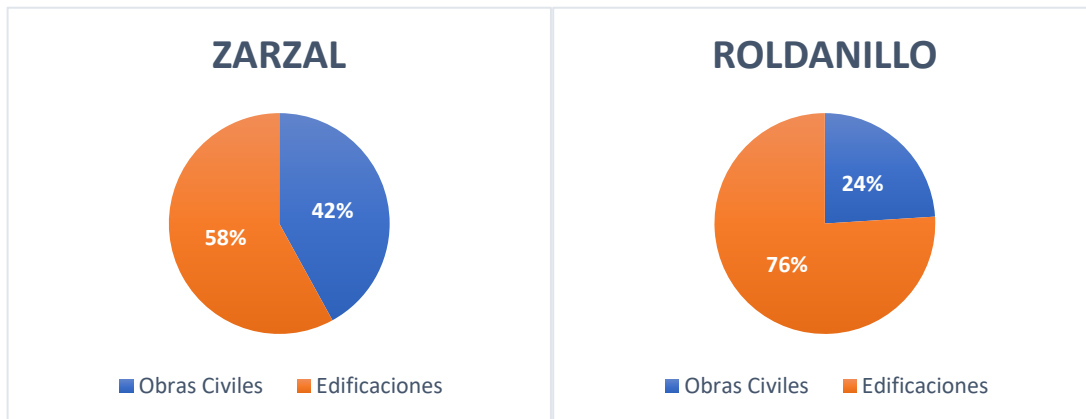
3.4.2 Área licenciada en los municipios de Zarzal y Roldanillo Valle del Cauca.

En el 2018 el área licenciada para el rubro de edificaciones tanto de vivienda nueva como edificaciones no habitacionales se recolectó en el área de planeación de las alcaldías municipales.

Se tiene que de acuerdo con los registros en el departamento de planeación del municipio de Zarzal en el periodo enero agosto del 2018, se otorgaron 110 licencias de construcción de las cuales se emitieron para edificación 105 equivalentes a 11.535 mt², en su mayoría de vivienda nueva y para el rubro de obra civil se otorgaron 4 licencias entre privadas y públicas equivalentes a 8.838 mt², entre las cuales se pueden mencionar, modificaciones a parques y puentes. El porcentaje de acuerdo con el rubro se puede observar en la figura 12.

Es necesario clarificar que la obra Construcción de la Etapa I – Sede Universitaria Zarzal, tiene licencia de construcción número 210-3906103 con un área aprobada de 11067.48 mt² expedida en el 2015. Por motivo de vencimiento fue actualizada en el año 2016.

Figura 12. Participación de rubros licenciados



Elaboración propia

Fuente: Departamento de planeación Alcaldía Zarzal y Roldanillo

El departamento de planeación del municipio de Roldanillo expidió en el periodo de enero al cierre del mes de octubre del 2018, 125 licencias de construcción, de las cuales se consideraron 122 para vivienda y destinos no habitacionales con un equivalente de 29.415 mt² licenciados, y el valor restante para obras civiles con un equivalente de 9.495 mt² licenciados. Las tres obras civiles corresponden a modificación de parque central, tramo de canalización de río y modificación de puente en un corregimiento. El porcentaje de acuerdo con el rubro se puede observar en la figura 12.

3.4 CONCLUSIONES

De los ítems anteriores se puede destacar que para el modelo matemático es relevante tener en cuenta que en la ejecución de una obra su magnitud es definida por el número de mt² licenciados. No es la misma situación para definir su número de actividades. Ejemplo: Las edificaciones de interés social se establece con un mismo diseño, lo cual permite que las casas se agrupen en módulos con un pequeño número de actividades iguales para cada módulo. No obstante, en la verificación de los metros licenciados para los permisos del área objeto de estudio se halló cierta proporcionalidad. Anexo a la idea anterior por su complejidad las obras civiles demuestran la necesidad de desglosar en más actividades la planeación y programación de un proyecto.

Desde el punto de vista de la empleabilidad al acelerar las actividades se incurre en el uso de más personal, recursos y materiales. Recursos de mano de obra que deben ser tenidos en cuenta según la localización del proyecto ya que no siempre están disponibles y debe de existir un margen aceptable entre la relación de tiempo y disponibilidad de recursos en la ejecución de las actividades.

CAPÍTULO 4

Este capítulo aborda tres secciones que conciernen al modelo matemático, caso de estudio y la aplicación del algoritmo. La primera sección desarrolla la modelación matemática ejemplificando la manera en que se acelera y minimiza el tiempo y el costo total del proyecto. El modelo matemático es el punto de partida para la programación del algoritmo genético. En la siguiente sección se describen las características de la obra Construcción de la Etapa I – Sede Universitaria Zarzal, donde se especifica el área de la obra, costos parciales y totales, número de actividades y su duración, consorcio contratista, duración y presupuesto total del proyecto. La tercera sección y como cierre del capítulo se presenta la aplicación del algoritmo y los resultados obtenidos con la ejecución del algoritmo genético NSGA-II.

La elaboración del modelo matemático se hizo con base en la literatura investigada y con la lógica del problema del DTCTP. Se establecieron dos funciones objetivas correspondientes a costo y tiempo, debidamente delimitadas por sus restricciones. Para la obtención de los resultados de la investigación se programó el algoritmo genético de clasificación no dominado NSGA-II en el lenguaje Java.

La obtención de los datos de la obra Construcción de la Etapa I – Sede Universitaria Zarzal, se realizó en contribución y permiso de la Universidad del Valle, consorcio Raok. La información de primera mano se obtuvo de la página del SECOP-II (Sistema Electrónico de Contratación Pública) donde se extrajo el pliego de peticiones inicial para la obra de construcción que publicó la Universidad del Valle, ofertándolo mediante licitación pública. De igual manera se obtuvo la propuesta inicial del Consorcio Raok a quien se le adjudicó el contrato, de la planeación y programación del desarrollo del proyecto (propuesta de costos y tiempos de ejecución de las actividades).

4.1 MODELACIÓN MATEMÁTICA

Con base en el modelo propuesto por Shahriari (2016), se presenta un modelo matemático de dos objetivos para equilibrar la compresión del tiempo del proyecto con el retraso de las actividades, el cual se resolvió utilizando NSGA-II. Para ello se consideraron los siguientes aspectos.

Se consideró este problema bajo el supuesto de que las duraciones de las tareas se pueden modelar mediante una distribución exponencial negativa, significa que la función tiempo-costo tomará valores de forma inversa, por ejemplo, si el tiempo disminuye el costo tiende a aumentar y viceversa.

El modelo matemático desarrolla una metodología efectiva para encontrar duraciones de tareas óptimas que minimicen el costo total esperado, definido por la suma de costos indirectos, directos y de incentivo.

El problema determinista de compresión del proyecto es bien conocido (Mitchell & Klastorin, 2007). Para describir este problema, se representa un proyecto mediante un gráfico acíclico dirigido $G = (N, A)$ con un conjunto de nodos o sucesos $N = (1, \dots, n)$ que representan momentos de comienzo o terminación de una actividad, un conjunto A de arcos dirigidos $(i, j)_{i, j \in N}$ que representan las actividades así como la relación de precedencia donde i representa el inicio y j su finalización. Se asume que las tareas $ij \in N$ están ordenadas lexicográficamente de manera que $i < j$ y tienen tiempos de duración d_{ij} (periodo programado real de la actividad ij o variable de decisión tiempo optimo), para todo $i = 1, \dots, n - 1$ y $j = 2, \dots, n$, y asumiendo que este valor discreto se encuentra entre $T_{a(ij)} \leq d_{ij} \leq T_{m(ij)}$, donde $T_{a(ij)}$ es el tiempo mínimo permitido de la actividad ij y $T_{m(ij)}$ el tiempo máximo permitido de la actividad ij .

El párrafo anterior nombra el valor discreto d_{ij} y esto se hace debido a que d_{ij} no es una variable continua, se toma la variable como periodos de tiempos exactos y definidos asociados a un recurso finito discreto.

En el problema determinista, se asume que el costo directo de realizar la tarea $ij \in N$ es una función exponencial del tiempo d_{ij} de la tarea comprimida y por cada unidad de tiempo de compresión C_{ij} es la unidad de dinero gastada, y por tanto, $\sum_i \sum_j C_{ij} (t_n - t_i)$ es el dinero total que se gasta en la compresión involucrada desde el día t_i hasta el día t_n (tiempo de finalización del proyecto).

El problema determinista de encontrar el plan óptimo de proyecto que minimiza los costos y duración totales se compone de C_{ij} que denota la tasa de costo de comprimir la actividad $ij \in N$, C'_{ij} la tasa de ahorro de retrasar la actividad $ij \in N$, CI denota los costos indirectos cargados durante la vida del proyecto por lo tanto cualquier reducción en la duración del proyecto significa una disminución en costos indirectos y el costo directo del proyecto CD (Gray & Larson, 2009). Las variables de decisión en el problema son d_{ij} (número de periodos para realizar determinada tarea $ij \in N$), t_n (tiempo de finalización del proyecto), y las variables de tipo binario y_{ij} , y'_{ij} y y''_{ij} que determinan si una tarea se acelera, retrasa o se realiza en el tiempo normal respectivamente.

El modelo presentado busca comprimir el tiempo de las actividades y minimizar el costo total del proyecto, para lo cual se formulan dos funciones objetivas.

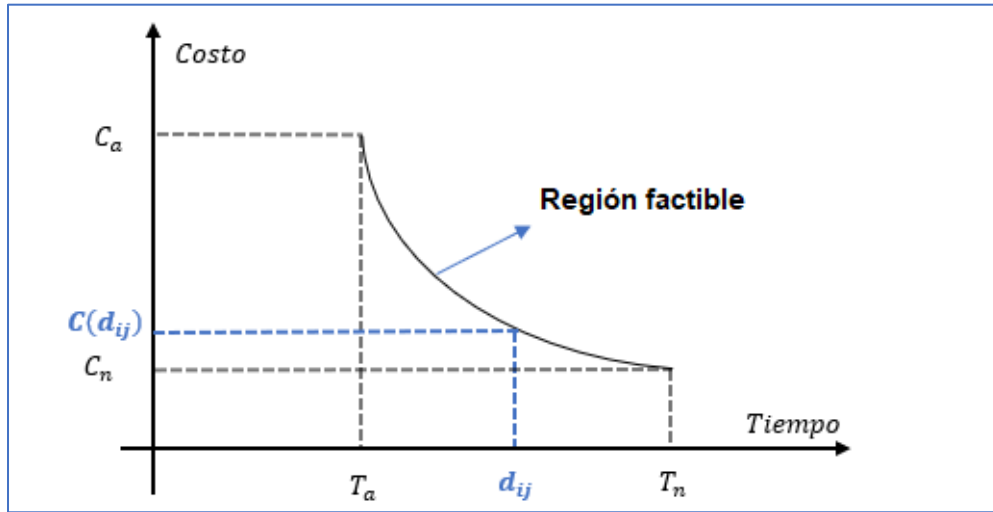
$$\text{Min } (Z_1) = CI (t_n - t_1) + CD + \sum_i \sum_j y_{ij} \cdot C_{ij} \{T_{n(ij)} - d_{ij}\} - \sum_i \sum_j y'_{ij} \cdot C'_{ij} \{T_{n(ij)} - d_{ij}\} \quad (1)$$

La función objetiva 1 correspondiente a costo total y está compuesta por: costo indirecto CI , más el costo directo CD , más costo de compresión $C_{ij} \{T_{n(ij)} - d_{ij}\}$,

menos el costo de ahorro de demora en las actividades $C'_{ij}\{T_{n(ij)} - d_{ij}\}$, como se muestra en (1), donde $T_{n(ij)}$ es el tiempo normal de la actividad $ij \in N$.

Una consideración importante para el desarrollo del modelo es que la función de costo es de tipo no lineal, significa que la curva tiempo-costo sigue un comportamiento exponencial. Varios autores han investigado esta relación. Yang, Chen, Valerdi, & Boehm (n.d.) en un estudio sobre la compresión de proyectos para desarrollo de software estudiaron tres herramientas que evalúan el comportamiento de la variable tiempo-costo, una de estas herramientas, SLIM, trata la compresión y expansión de horarios en términos de una región imposible y una región poco práctica. Teóricamente, el calendario estimado caerá en la región de compensación factible. Dentro de la región de compensación factible, si se comprime el programa, el esfuerzo aumentará exponencialmente. Según el PMI (2009), al considerar el tiempo, costo y calidad y asumiendo que la tercera variable permanece fija (calidad), el costo se puede considerar como una función del tiempo, y la relación entre los dos se puede trazar como una curva exponencial. Moussourakis & Haksever (2010) presentan tres modelos de programación lineal de enteros mixtos para ayudar a los gerentes de proyecto a tomar decisiones para comprimir el tiempo de finalización del proyecto bajo supuestos de relación de tiempo-costo de actividad realistas. Los modelos asumen funciones de tiempo-costo de actividad no lineales que son funciones racionales que pueden ser convexas o cóncavas. En la figura 13 se representa esta relación.

Figura 13. Relación entre duración de las Actividades y el Costo



Elaboración propia

Asumiendo que la figura 13 tiene una relación exponencial entre el tiempo de compresión y el costo de compresión de las actividades, donde C_a y C_n son los costos acelerados y normales de cada actividad y T_a y T_n los tiempos normales y acelerados respectivamente. Entonces se tiene:

$$C(d_{ij}) = \alpha \cdot e^{-\beta \cdot d_{ij}} \quad (2)$$

$$\beta = \frac{\ln(C_n/C_a)}{T_a - T_n} \quad (3)$$

Entonces,

$$\alpha = e^{\{ \ln(C_n) + \beta \cdot T_n \}} \quad (4)$$

De acuerdo con lo anterior el coeficiente de ahorro se comporta de la misma forma, cuando el tiempo de ejecución de las actividades se ha extendido respecto al tiempo normal.

$$C'(d_{ij}) = \alpha' \cdot e^{-\beta' \cdot d_{ij}} \quad (5)$$

$$\beta' = \frac{\ln(C_m/C_n)}{T_n - T_m} \quad (6)$$

Entonces,

$$\alpha' = e^{\{ \ln(C_m) + \beta' \cdot T_m \}} \quad (7)$$

Donde C_m y T_m son los tiempos y costos de retardo de cada actividad respectivamente. De esta forma al sustituir (2) y (5) en (1), y remplazando el costo directo CD por la expresión $\sum_i \sum_j y''_{ij} \cdot C_{n(ij)}$, se tiene que:

$$\begin{aligned} \text{Min}(Z_1) = & CI(t_n - t_1) + \sum_i \sum_j y_{ij} \cdot \alpha_{ij} \cdot e^{-\beta_{ij} \cdot d_{ij}} + \sum_i \sum_j y'_{ij} \cdot \alpha'_{ij} \cdot e^{-\beta'_{ij} \cdot d_{ij}} \\ & + \sum_i \sum_j y''_{ij} \cdot C_{n(ij)} \end{aligned} \quad (8)$$

La función objetivo 2 se considera como el tiempo de finalización del proyecto de la siguiente manera:

$$\text{Min}(Z_2) = t_n \quad (9)$$

Para las restricciones del modelo se hace la presunción de que $t_j - t_i \geq d_{ij}$, donde t_j denota el evento o periodo de terminación de la actividad $ij \in N$ y t_i el evento o periodo de inicio actividad $ij \in N$ lo que significa que la variable d_{ij} toma un valor entero positivo de esta diferencia.

Para restricciones de tiempo mínimos permitidos $T_{a(ij)}$ y máximos permitidos $T_{m(ij)}$, que la variable d_{ij} puede tomar se creó las siguientes expresiones (10), (11):

$$y_{ij} \cdot T_{a(ij)} \leq y_{ij} \cdot d_{ij} \leq y_{ij} \cdot T_{m(ij)}; \quad \forall i, j \quad (10)$$

$$y'_{ij} \cdot T_{n(ij)} \leq y'_{ij} \cdot d_{(ij)} \leq y'_{(ij)} \cdot T_{m(ij)}; \quad \forall i,j \quad (11)$$

Si la actividad en cuestión no se ha comprimido ni retrasado, quiere decir que cumple con una restricción lógica de igualdad entre $d_{(ij)}$ y $T_{n(ij)}$ así:

$$y''_{ij} \cdot d_{(ij)} = T_{n(ij)} \cdot y''_{(ij)}; \quad \forall i,j \quad (12)$$

Para las variables de tipo binario se debe cumplir la condición de la ecuación número 13, además de la restricción del tiempo de terminación del proyecto mostrada en la ecuación número 14.

$$y_{ij} + y'_{ij} + y''_{ij} = 1; \quad \forall i,j \quad (13)$$

$$t_n \leq T_{max} \quad (14)$$

Para el costo total disponible del proyecto o costo máximo permitido C_{max} , este no puede ser sobrepasado por la suma de los costos indirectos del proyecto CI , más los costos directos del proyecto relacionados directamente con el costo normal por actividad y su incremento o disminución en caso de que se acelere o retrase ciertas tareas.

$$CI(t_n - t_1) + \sum_i \sum_j y_{ij} \cdot \alpha_{ij} e^{-B_{ij} \cdot d_{(ij)}} + \sum_i \sum_j y'_{ij} \cdot \alpha'_{ij} e^{-B'_{ij} \cdot d_{(ij)}} + \sum_i \sum_j y''_{ij} \cdot C_{n(ij)} \leq C_{max} \quad (15)$$

La restricción de no negatividad para los eventos se expresa como $t_i \geq 0$.

4.2 ACERCA DEL PROYECTO DE CONSTRUCCIÓN

El Campus las balsas pertenecientes a la universidad del Valle sede Zarzal, consta de 50.008 mt^2 de los cuales se destinaron 11.067 mt^2 para la obra civil Construcción de la Etapa I – Sede Universitaria Zarzal, divididos entre área con cubierta y sin ella. Los estudios preliminares planearon la construcción de la obra en 4 módulos que se definieron como Aulas, Cafetería-Restaurante, Graderías-Vestier-Piscina y Zonas exteriores de ahora en adelante módulo 1, 2, 3 y 4 respectivamente. El presupuesto disponible para la obra civil fue de \$ 9.164.405.151 y la firma contratista propuso una planeación y programación del proyecto resumida en la tabla 1.

El consorcio Raok ejecuto el proyecto por módulo y de forma paralela por consiguiendo el algoritmo genético se aplicó de forma independiente para cada uno de estos, (información verificada en los diagramas de red y cronogramas obtenidos del Secop). En la tabla 2 se presenta los módulos con número de actividades, rutas críticas y costos directos.

Tabla 1. Programación del proyecto

Costo directo	\$ 6.733.473.346	COP
Costo Indirecto	\$ 1.672.792.274	COP
Imprevistos	\$ 96.288.669	COP
Utilidad	\$ 296.272.827	COP
IVA sobre utilidad	\$ 47.403.652	COP
Presupuesto total	\$ 8.846.230.768	COP
Tiempo Programado	513	Días

Tabla 2. Costos directos y tiempo de terminación por módulo.

Módulo	Tiempo de terminación	Costo directo	Actividades por Módulo
AULAS	513	\$ 3.623.752.600	17
CAFETERIA-RESTAURANTE	281	\$ 338.643.801	14
GRADERIAS-VESTIER-PISCINA	336	\$ 1.231.212.819	19
ZONAS EXTERIORES	299	\$ 1.539.864.126	38

4.3 APLICACIÓN DEL ALGORITMO PARA OPTIMIZAR TIEMPO-COSTO EN EL PROYECTO DE CONSTRUCCIÓN

En esta sección se aplicó el modelo matemático por medio del algoritmo genético NSGA-II, para dar solución al problema del DTCTP presentado en la obra de construcción de la Etapa I – Sede Universitaria Zarzal. Para el suministro de datos de entrada como se planteó en el desarrollo del modelo, se necesitaron los rangos de tiempo-costo de las actividades del proyecto, de los cuales, en la información otorgada por el consorcio estaban plasmados los costos y tiempos normales por actividad. Para los pares de tiempo-costo tanto acelerado como de retraso fue indispensable la colaboración de un arquitecto quien dirigió los criterios para asignar las flexibilidades de tiempo-costo de aceleración y retraso de las actividades según su naturaleza. En la tabla 3 se muestran las 88 actividades con sus respectivos tiempos y costos acelerados, normales y retardados correspondientes a los cuatro módulos planeados para llevar a cabo el proyecto.

Criterios de asignación de tiempos y costos:

- Según los criterios del arquitecto, para asignar tiempo acelerado y de demora a cada actividad se realiza con base en el rendimiento de cada tarea en un rango porcentual delimitado por un incremento y disminución en un 30% para la aceleración y demora. Además, adujo que es indispensable conocer la naturaleza de las actividades, por consiguiente, el porcentaje de rendimiento especificado no puede ser mayor, de lo contrario afectaría las características de las actividades creando una situación que no es real, de esta manera se pueden abarcar las actividades de mampostería, uso de equipos pesados, obra blanca, etc. La mayoría

Tabla 3. Datos de entrada tiempo-costo

	IETEM	Ta	Tn	Tm	Ca	Cn	Cm
AULAS	A1	6	8	10	\$ 14.717.541	\$ 11.774.033	\$ 8.830.525
	A2	53	75	98	\$ 1.137.649.416	\$ 879.625.837	\$ 609.873.914
	A3	90	90	90	\$ 916.328.259	\$ 916.328.259	\$ 916.328.259
	A4	32	45	59	\$ 241.574.918	\$ 187.428.816	\$ 129.117.629
	A5	42	60	78	\$ 257.844.867	\$ 198.342.206	\$ 138.839.544
	A6	14	20	26	\$ 100.064.851	\$ 76.972.963	\$ 53.881.074
	A7	21	30	39	\$ 371.339.852	\$ 285.646.040	\$ 199.952.228
	A8	80	80	80	\$ 136.668.009	\$ 136.668.009	\$ 136.668.009
	A9	32	46	60	\$ 40.248.839	\$ 30.857.444	\$ 21.466.048
	A10	32	46	60	\$ 21.848.368	\$ 16.750.415	\$ 11.652.463
	A11	295	295	295	\$ 125.212.900	\$ 125.212.900	\$ 125.212.900
	A12	25	35	46	\$ 7.114.036	\$ 5.533.139	\$ 3.794.153
	A13	19	27	35	\$ 19.030.619	\$ 14.680.763	\$ 10.330.908
	A14	70	100	130	\$ 11.531.947	\$ 8.870.728	\$ 6.209.510
	A15	100	100	100	\$ 139.043.946	\$ 139.043.946	\$ 139.043.946
	A16	168	240	312	\$ 760.827.089	\$ 585.251.607	\$ 409.676.125
	A17	12	12	12	\$ 4.765.496	\$ 4.765.496	\$ 4.765.496
CAFETERIA RESTAURANTE	A1	6	8	10	\$ 3.882.631	\$ 3.106.105	\$ 2.329.578
	A2	42	60	78	\$ 116.440.843	\$ 89.569.879	\$ 62.698.915
	A3	75	75	75	\$ 77.363.961	\$ 77.363.961	\$ 77.363.961
	A4	42	60	78	\$ 22.163.192	\$ 17.048.609	\$ 11.934.026
	A5	42	60	78	\$ 47.197.420	\$ 36.305.708	\$ 25.413.995
	A6	7	10	13	\$ 37.094.098	\$ 28.533.922	\$ 19.973.745
	A7	6	8	10	\$ 30.947.501	\$ 24.758.001	\$ 18.568.501
	A8	45	45	45	\$ 34.271.248	\$ 34.271.248	\$ 34.271.248
	A9	18	25	33	\$ 8.331.313	\$ 6.508.838	\$ 4.426.010
	A10	14	20	26	\$ 7.890.075	\$ 6.069.288	\$ 4.248.502
	A11	11	15	20	\$ 2.492.082	\$ 1.967.433	\$ 1.311.622
	A12	14	20	26	\$ 3.220.220	\$ 2.477.092	\$ 1.733.965
	A13	20	20	20	\$ 7.226.661	\$ 7.226.661	\$ 7.226.661
	A14	15	15	15	\$ 3.437.056	\$ 3.437.056	\$ 3.437.056
GRADERIAS-VESTIER-PISCINA	A1	6	8	10	\$ 5.248.105	\$ 4.198.484	\$ 3.148.863
	A2	42	60	78	\$ 432.337.264	\$ 332.567.126	\$ 232.796.988
	A3	75	75	75	\$ 279.302.897	\$ 279.302.897	\$ 279.302.897
	A4	21	30	39	\$ 22.886.521	\$ 17.605.016	\$ 12.323.511
	A5	32	45	59	\$ 90.176.914	\$ 69.964.847	\$ 48.198.006
	A6	7	10	13	\$ 45.667.178	\$ 35.128.599	\$ 24.590.019
	A7	6	8	10	\$ 82.693.201	\$ 66.154.561	\$ 49.615.921
	A8	25	25	25	\$ 31.031.447	\$ 31.031.447	\$ 31.031.447
	A9	11	15	20	\$ 18.391.718	\$ 14.519.777	\$ 9.679.852
	A10	7	10	13	\$ 12.888.042	\$ 9.913.878	\$ 6.939.715
	A11	3	4	5	\$ 3.608.854	\$ 2.887.083	\$ 2.165.312
	A12	4	5	7	\$ 32.238.827	\$ 26.865.689	\$ 16.119.414
	A13	60	60	60	\$ 227.169.431	\$ 227.169.431	\$ 227.169.431

	IETEM	Ta	Tn	Tm	Ca	Cn	Cm
	A14	18	25	33	\$ 60.393.897	\$ 47.182.732	\$ 32.084.258
	A15	4	5	7	\$ 15.661.017	\$ 13.050.847	\$ 7.830.508
	A16	7	10	13	\$ 5.968.507	\$ 4.591.159	\$ 3.213.811
	A17	4	4	4	\$ 40.751.243	\$ 40.751.243	\$ 40.751.243
	A18	7	10	13	\$ 3.845.989	\$ 2.958.453	\$ 2.070.917
	A19	10	10	10	\$ 5.369.549	\$ 5.369.549	\$ 5.369.549
ZONAS EXTERIORES	A1	3	4	5	\$ 78.398.075	\$ 62.718.460	\$ 47.038.845
	A2	72	90	117	\$ 207.244.319	\$ 172.703.599	\$ 120.892.519
	A3	70	100	130	\$ 97.618.909	\$ 75.091.468	\$ 52.564.028
	A4	53	75	98	\$ 125.544.335	\$ 97.070.362	\$ 67.302.118
	A5	21	30	39	\$ 264.249.923	\$ 203.269.172	\$ 142.288.420
	A6	1	2	3	\$ 877.730	\$ 585.153	\$ 292.577
	A7	2	2	2	\$ 3.824.325	\$ 3.824.325	\$ 3.824.325
	A8	5	5	5	\$ 5.790.935	\$ 5.790.935	\$ 5.790.935
	A9	2	3	4	\$ 2.906.602	\$ 2.179.952	\$ 1.453.301
	A10	2	3	4	\$ 5.659.203	\$ 4.244.402	\$ 2.829.601
	A11	2	3	4	\$ 2.865.908	\$ 2.149.431	\$ 1.432.954
	A12	1	2	3	\$ 1.583.084	\$ 1.055.389	\$ 527.695
	A13	4	4	4	\$ 3.470.205	\$ 3.470.205	\$ 3.470.205
	A14	1	1	1	\$ 1.134.060	\$ 1.134.060	\$ 1.134.060
	A15	1	2	3	\$ 1.591.247	\$ 1.060.831	\$ 530.416
	A16	2	3	4	\$ 91.085.160	\$ 68.313.870	\$ 45.542.580
	A17	42	60	78	\$ 11.502.433	\$ 8.848.026	\$ 6.193.618
	A18	15	15	15	\$ 9.282.203	\$ 9.282.203	\$ 9.282.203
	A19	15	15	15	\$ 304.323.485	\$ 304.323.485	\$ 304.323.485
	A20	21	30	39	\$ 200.124.857	\$ 153.942.198	\$ 107.759.538
	A21	45	45	45	\$ 42.059.384	\$ 42.059.384	\$ 42.059.384
	A22	15	15	15	\$ 13.173.111	\$ 13.173.111	\$ 13.173.111
	A23	20	20	20	\$ 6.484.136	\$ 6.484.136	\$ 6.484.136
	A24	14	20	26	\$ 9.150.255	\$ 7.038.657	\$ 4.927.060
	A25	11	15	20	\$ 2.983.821	\$ 2.355.648	\$ 1.570.432
	A26	14	20	26	\$ 5.121.486	\$ 3.939.605	\$ 2.757.723
	A27	21	30	39	\$ 9.192.075	\$ 7.070.827	\$ 4.949.579
	A28	45	45	45	\$ 41.200.349	\$ 41.200.349	\$ 41.200.349
	A29	21	30	39	\$ 27.094.115	\$ 20.841.627	\$ 14.589.139
	A30	14	20	26	\$ 39.469.813	\$ 30.361.395	\$ 21.252.976
	A31	11	15	20	\$ 3.207.806	\$ 2.532.479	\$ 1.688.319
	A32	11	15	20	\$ 5.451.458	\$ 4.303.782	\$ 2.869.188
	A33	11	15	20	\$ 60.670.337	\$ 47.897.635	\$ 31.931.757
	A34	7	10	13	\$ 94.625.227	\$ 72.788.636	\$ 50.952.045
	A35	4	5	7	\$ 23.018.463	\$ 19.182.053	\$ 11.509.232
	A36	20	20	20	\$ 14.446.090	\$ 14.446.090	\$ 14.446.090
	A37	10	10	10	\$ 13.755.480	\$ 13.755.480	\$ 13.755.480
	A38	6	8	10	\$ 11.719.631	\$ 9.375.704	\$ 7.031.778

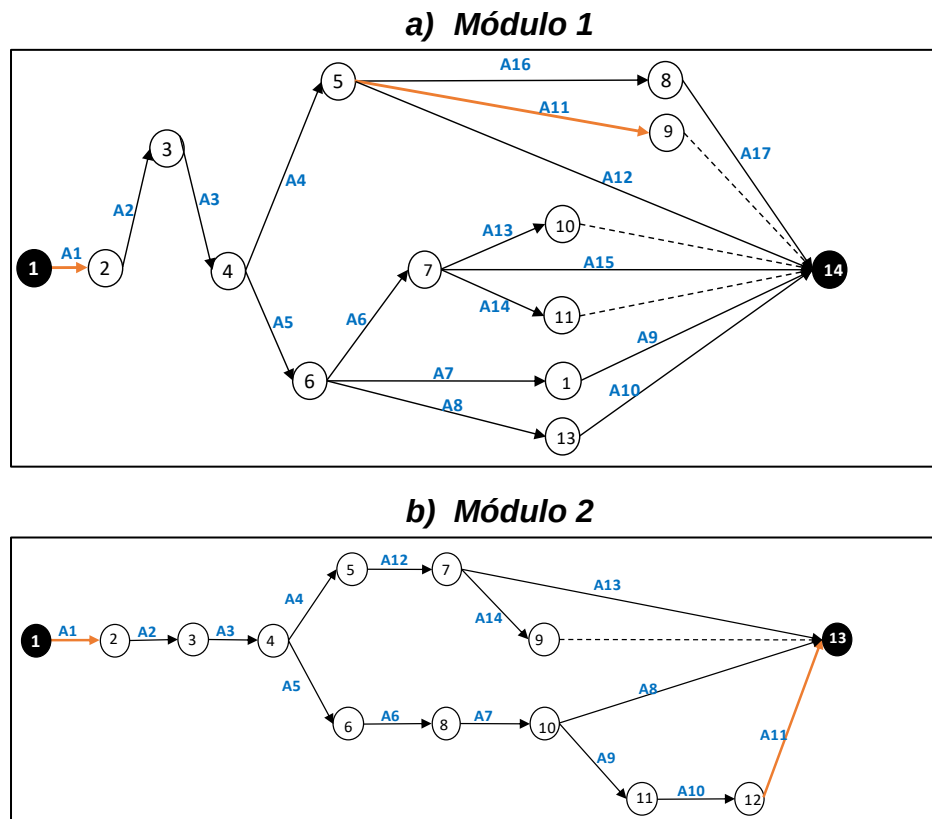
de las actividades del proyecto se cubrieron con esta tasa de rendimiento. No obstante, algunas actividades de estructura y cimentación son sensibles a la alteración de sus duraciones, debido a su composición fisicoquímicas de dureza y calidad, por lo tanto, no fue posible acelerarlas ni demorarlas.

- Para asignar costos de aceleración y demora el arquitecto recomendó desglosar el costo normal de la actividad por su número de periodos, de esta manera se obtuvo el costo por periodo, seguidamente al costo por periodo fue sumado y restado al costo normal de las actividades de acuerdo con el número de periodos acelerados o retardados. Este ítem también viene acompañado del criterio de rendimiento en la operación, donde a mayor rendimiento el costo tiende a incrementar y a menor rendimiento a disminuir. De esta manera se completó la tabla de datos de entrada para el algoritmo.

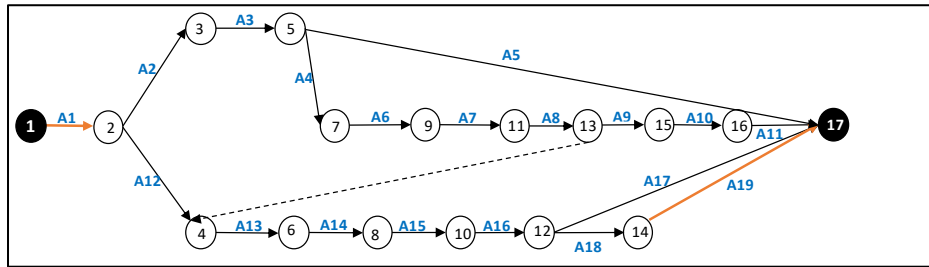
Un factor relevante para la solución del DTCTP es el de las dependencias entre actividades. Estas dependencias definen la ruta crítica la cual es el punto de partida para que el algoritmo inicie la búsqueda de soluciones cuasi optimas de aceleración y costo del proyecto.

Los diagramas de red desarrollados por el consorcio Raok de cada módulo estaban contruidos con la actividad en el nodo (AoN), no obstante, para el mapeo de las dependencias en el algoritmo se llevó la activad al arco convirtiendo el diagrama de red en AoA, como muestra la figura 14.

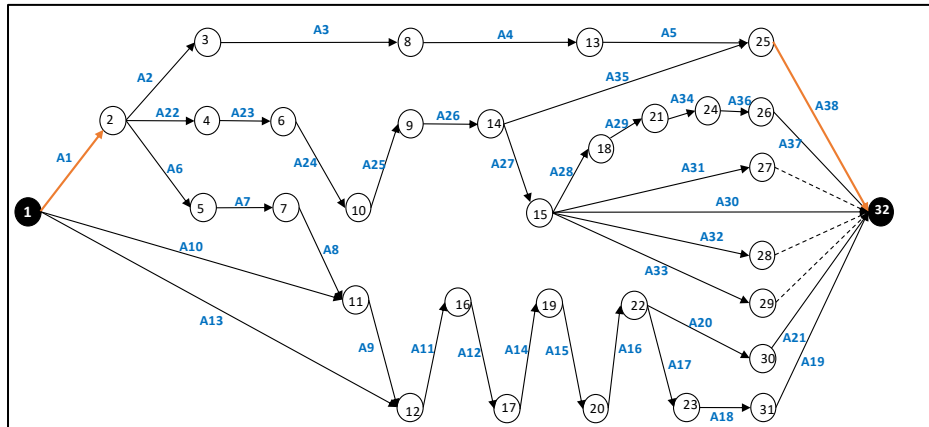
Figura 14. Diagrama de red del proyecto



c) Módulo 3



d) Módulo 4



La programación del algoritmo se realizó de tal manera que se obtuviese un modelo general que fuese aplicable a cualquier problema del DTCTP, teniendo en cuenta que a mayor número de actividades y genes a mutar será mayor el consumo de recursos computacionales y tiempo en maquina requeridos. Sin embargo, las características del algoritmo en cada iteración arrojaron excelentes tiempos computacionales, puntualizando en las condiciones del proyecto en curso, el promedio de iteración fue de 3 a 4 segundos, un eficiente tiempo computacional ya que si por la complejidad del problema como lo expone González (2013) un proyecto formado por 30 actividades con 2 posiciones de holgura para cada una de ellas, el universo de soluciones para procesar cada una de ellas serían: 1.073 millones de soluciones. Si se dispusiese de una máquina capaz de procesar 1 millón de soluciones al problema por segundo, ésta tardaría 1.073 segundos.

En la figura 15 se muestra la interfaz del algoritmo la cual está constituida por los siguientes parámetros de entrada:

Campo de numero de tareas: Representan la cantidad total de actividades programadas para la culminación de la obra.

Cargar archivos de tareas y rutas: se cargan dos archivos de texto que contienen la información correspondiente a las tareas con sus respectivos tiempos y costos acelerados, normales y retardados (Tabla 3) y la lista de dependencias de las actividades (figura 14).

Costo indirecto: se ingresa el valor constante correspondiente al costo indirecto por periodo del proyecto.

Semilla aleatoria: está programada en un rango de -1 a 9 donde a menor valor el número de soluciones se repiten en mayor grado, en caso contrario se generan soluciones con valores similares de tiempo y costo, pero no iguales.

Función cruce: se tiene la opción de marcar el tipo de cruce en un punto o uniforme. Para la obtención de resultados de la investigación se marca en un punto con el propósito de no variar de forma trascendental las soluciones iniciales.

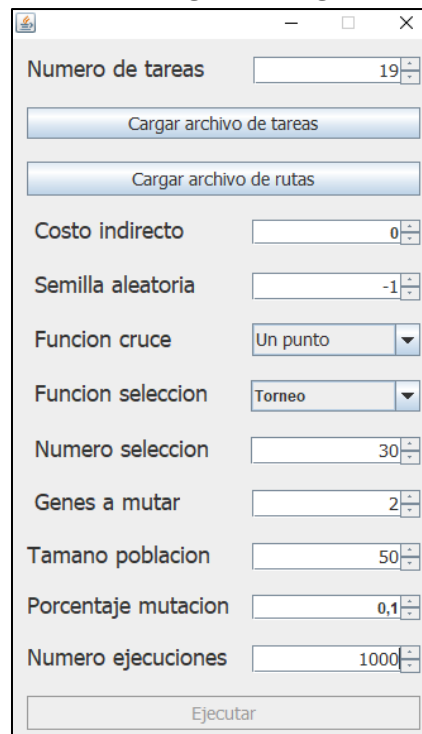
Función selección: se tiene la opción de marcar selección por elitismo, torneo y ruleta. Para la investigación se selecciona torneo donde se toman al azar 2 cromosomas, y se opta por el que tenga mayor función de aptitud. Se repite este procedimiento k veces.

Numero selección: corresponde al número de soluciones k para conformar el mating pool (población de donde empieza a generarse la descendencia).

Genes a mutar: se marca el número de genes o actividades que se desee mutar.

Tamaño población: representa el número de cromosomas o posibles soluciones iniciales N a generar. Por otra parte, el número de ejecuciones marca las iteraciones que el algoritmo estará en ejecución generando las N soluciones cuasi óptimas.

Figura 15. Interfaz algoritmo genético NSGA-II



The image shows a Java-based graphical user interface for the NSGA-II algorithm. It features a window with a title bar and standard OS controls. The interface is organized into a vertical list of parameters, each with a text label and a corresponding input field. The input fields are either text boxes or spinners. Two buttons, 'Cargar archivo de tareas' and 'Cargar archivo de rutas', are positioned between the 'Numero de tareas' and 'Costo indirecto' fields. At the bottom, there is a large 'Ejecutar' button. The parameters and their current values are as follows:

Parameter	Value
Numero de tareas	19
Costo indirecto	0
Semilla aleatoria	-1
Funcion cruce	Un punto
Funcion seleccion	Torneo
Numero seleccion	30
Genes a mutar	2
Tamano poblacion	50
Porcentaje mutacion	0,1
Numero ejecuciones	1000

Desarrollado mediante lenguaje Java

Con la información de entrada preestablecida, se prosiguió a definir los parámetros para correr el algoritmo NSGA-II al proyecto de aplicación. Es importante aclarar que el programa se ejecutó para cada uno de los módulos. Al considerarse que los módulos se ejecutan en paralelo se estableció un costo indirecto por periodo correspondiente a \$ 4.582.993 solo para el módulo que contenía la ruta crítica más larga. A todos los módulos se les asignó una semilla aleatoria con valor de 4, se utilizó la función cruce en un punto con un porcentaje de 0,15% y la función selección por torneo (pares de cromosomas). Un tamaño de población de 50 soluciones, un valor de selección de 30 padres y se ejecutó por 1000 iteraciones. El número de actividades para el módulo de Aulas se conformó por 17 actividades, el módulo Cafetería-Restaurante por 14 actividades, Graderías-Vestier-Piscina conformado por 19 actividades y Zonas exteriores por 38. Los costos directos y tiempos de terminación iniciales por módulo (ruta crítica) se muestran en la tabla 2.

En la siguiente sección se muestran los resultados obtenidos de la investigación. Los resultados para cada módulo presentan el frente de Pareto formado por 50 soluciones, donde cada solución especifica los tiempos y costos de sus actividades correspondientes. Como se mencionó anteriormente el costo indirecto total se calculó basado en la ruta crítica más larga de los módulos, de esta forma se obtuvo el costo total y tiempo de terminación del proyecto. Obtenidas las 50 soluciones los gerentes o administrados del proyecto tienen la opción de determinar cuál es la solución que mejor se ajuste a sus necesidades en cuanto a costo y tiempo de terminación. Explícitamente tienen cronogramas opcionales si desean acelerar o demorar el proyecto a un mínimo costo.

4.4 RESULTADOS

En esta sección se plasman los resultados obtenidos mediante la ejecución del algoritmo genético NSGA-II. Con el fin de no ser repetitivo en el análisis de los resultados se interpreta a fondo los datos del módulo 1 y la interpretación de los demás módulos se encuentra en los anexos. Las tablas 4a, 4b, 4c y 4d, contienen las soluciones de los cuatro módulos respectivamente, en ellas se muestra el tiempo de terminación, costo total directo, periodos acelerados y de retraso para las 50 soluciones. Esta información también se puede visualizar en las figuras 16, 17, 18 y 19, para cada módulo respectivamente que grafican la formación del frente de Pareto con las soluciones factibles y la curva exponencial formada de la relación tiempo-costos. En el mismo orden para los cuatro módulos las tablas 6a, 6b, 6c y 6d, consolidan los valores de tiempo que tomó cada una de las actividades en las 50 soluciones.

El módulo 1 con 17 actividades fue programado por el consorcio con una ruta crítica de 513 días y un costo directo de \$ 3.623.752.600, correspondiente a la suma total de todas las actividades. Los valores anteriores son el punto de partida para que el algoritmo acelere y demore la terminación del módulo 1 al mínimo costo. En las soluciones de la tabla 4a se observan las 50 soluciones cuasi óptimas del algoritmo donde la ruta crítica o el tiempo de terminación del módulo 1 se puede reducir hasta

361 periodos a un costo total de \$ 3.923.120.142 que comparado con los valores iniciales normales de la tabla 2, aceleran la terminación del módulo en 152 periodos con un incremento de \$ 299.277.542.

Tabla 4a. Resultados módulo 1 de tiempo-costo, valores de compresión y retraso en actividades.

No	Tiempo	Costo	Periodos Acelerados	Periodos de Retraso	No	Tiempo	Costo	Periodos Acelerados	Periodos de Retraso
1	361	\$ 3.923.120.143	109	108	26	437	\$ 3.277.000.358	72	147
2	363	\$ 3.915.560.592	107	92	27	445	\$ 3.261.312.318	54	126
3	364	\$ 3.909.378.683	106	108	28	446	\$ 3.259.904.474	53	117
4	367	\$ 3.846.047.129	103	108	29	450	\$ 3.241.402.704	54	131
5	370	\$ 3.836.069.525	100	93	30	452	\$ 3.235.883.293	53	139
6	375	\$ 3.752.950.515	95	93	31	453	\$ 3.229.875.284	54	144
7	378	\$ 3.718.845.401	92	98	32	454	\$ 3.228.293.643	53	142
8	380	\$ 3.704.526.052	90	104	33	465	\$ 3.216.124.254	32	122
9	382	\$ 3.677.132.032	88	92	34	469	\$ 3.199.105.045	32	126
10	385	\$ 3.638.317.544	87	100	35	470	\$ 3.195.125.942	32	127
11	386	\$ 3.637.808.935	86	101	36	478	\$ 3.177.311.208	30	128
12	392	\$ 3.549.263.909	87	112	37	495	\$ 3.132.984.677	11	121
13	399	\$ 3.467.258.173	87	124	38	496	\$ 3.127.865.775	11	135
14	400	\$ 3.464.572.335	86	120	39	505	\$ 3.109.395.735	2	131
15	402	\$ 3.437.718.402	87	103	40	508	\$ 3.106.566.387	0	135
16	406	\$ 3.395.344.655	87	131	41	526	\$ 3.059.257.715	2	137
17	406	\$ 3.395.344.655	87	131	42	530	\$ 3.046.669.157	0	141
18	414	\$ 3.360.415.706	79	131	43	539	\$ 3.034.658.749	2	157
19	419	\$ 3.341.775.978	74	127	44	540	\$ 3.029.760.902	2	161
20	421	\$ 3.331.480.950	74	133	45	541	\$ 3.026.545.900	2	162
21	422	\$ 3.328.587.971	74	118	46	546	\$ 3.007.153.891	2	162
22	426	\$ 3.309.334.407	74	138	47	547	\$ 3.001.867.692	2	168
23	428	\$ 3.308.071.228	74	138	48	549	\$ 2.994.807.278	2	170
24	432	\$ 3.286.796.152	74	141	49	564	\$ 2.972.782.121	2	187
25	433	\$ 3.282.887.375	74	145	50	573	\$ 2.945.646.160	0	189

El valor del incremento anterior conduce a pensar que es un valor de incremento muy bajo para el total de periodos reducidos, y es muy lógico, sin embargo, es una de las bondades de agregar una variable discreta de tiempo límite de demora ya que el algoritmo acelera las actividades que están en la ruta crítica asignando recursos y demora las que no están obteniendo un ahorro de recursos. La tabla 5 presenta la solución 1 del módulo 1 donde la ruta crítica se mantuvo en las actividades A1, A2, A3, A4, A16, A17 y al comparar los tiempos de estas actividades con los normales presentados en la tabla 3, se observa el número de periodos acelerados por actividad y su costo total asociado. Por el contrario, las que no son significativas para el tiempo de terminación del módulo 1 se retrasan obteniendo un ahorro en el costo de terminación, de la misma forma se puede verificar comparando las actividades de la tabla 5 con la tabla 3 que no están en la ruta crítica, como ejemplo, compárese los valores de tiempo de la actividad A12 de la solución 1 con los datos normales de la tabla 3, donde se observa que hubo un retardo en el tiempo de terminación de la actividad, pasando de una terminación normal de 35 periodos a una demorada de 45 periodos con un ahorro de \$1.606.591. Es preciso mencionar

que el tiempo de demora máximo establecido para la actividad 12 es de 46, sin embargo, el algoritmo encontró que 45 era un óptimo para demorarla. De esta manera si se realiza la sumatoria en tiempo y costo tanto para las actividades aceleradas como las demoradas se obtiene el costo y tiempo total de la solución 1 haciendo posible determinar su incremento o ahorro total.

Tabla 5. Tiempo-costo solución factible módulo 1.

Actividad	Tiempo	Costo	Actividad	Tiempo	Costo
A1	6	\$ 14.717.542	A10	60	\$ 11.652.463
A2	53	\$ 1.137.649.408	A11	295	\$ 125.212.896
A3	90	\$ 916.328.256	A12	45	\$ 3.926.548
A4	32	\$ 241.574.912	A13	35	\$ 10.330.908
A5	78	\$ 138.839.552	A14	129	\$ 6.283.777
A6	26	\$ 53.881.072	A15	100	\$ 139.043.952
A7	39	\$ 199.952.224	A16	168	\$ 760.827.072
A8	80	\$ 136.668.016	A17	12	\$ 4.765.497
A9	60	\$ 21.466.048			

Es preciso recordar que algunas actividades por su naturaleza no se pueden demorar ni acelerar, por ende, la duración y el tiempo de la actividad se mantiene normal. En la solución 1 las actividades que conservan el tiempo son: A3, A8, A11, A15, A17, se puede verificar también comparando la tabla 3 con la tabla 5.

En el párrafo anterior se analizó la solución 1 que correspondía a la duración más corta en la cual podía terminarse el módulo 1, sin embargo, la solución 50 presenta una alternativa en la cual el proyecto puede demorarse hasta 573 días a un costo de \$ 2.945.646.160. Al compararse con los valores de tiempo y costo normales del módulo 1 presentados en la tabla 2 se observa un incremento en 60 periodos para la terminación del módulo, en cuanto al costo ya que se le extraen recursos debido a la dilatación del tiempo de terminación se obtiene un ahorro de \$678.106.440.

Los valores anteriores consolidan los extremos de las soluciones, sin embargo, en la tabla 4a hay 48 soluciones más de las cuales el gerente puede decidir cual utilizar según su situación o requerimiento en cuanto a costo y tiempo.

La figura 16 muestra el frente de Pareto que se forma con las 50 soluciones cuasi optimas del DTCTP que arroja el algoritmo NSGA-II para el módulo 1, también se observa como una solución es mejor que la otra en alguno de sus objetivos, además las soluciones marcan la tendencia del problema de compensación tiempo-costo discreto donde a medida que el algoritmo busca mejores soluciones, el tiempo de terminación del módulo se va reduciendo a un costo mayor.

Cabe resaltar que el frente de Pareto tiene graficado las soluciones únicas que arrojó el algoritmo por módulo, es decir, si se observa detenidamente la tabla 4a, tiene 49 soluciones únicas ya que la solución 16 se encuentra repetida una vez, y si se observa la tabla 4b correspondiente al módulo 2, esta tiene 32 valores únicos,

Figura 16. Frente de Pareto módulo 1

Módulo 1 - Costo vs. Tiempo

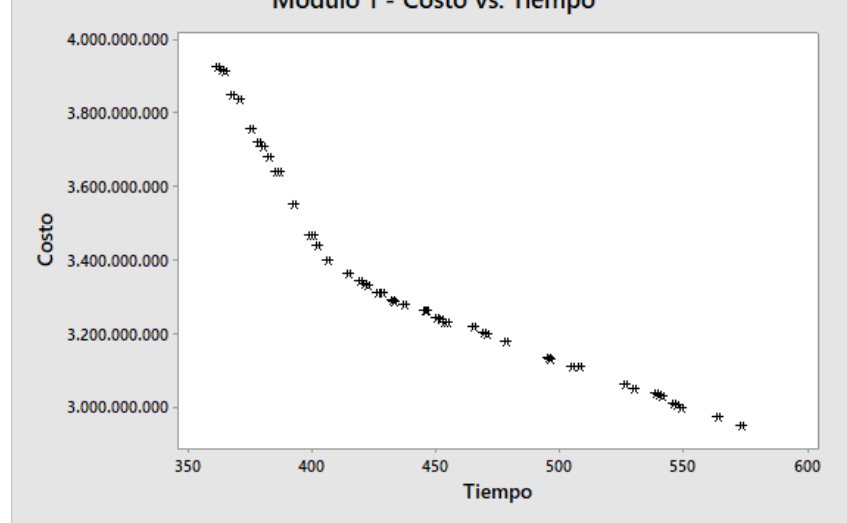


Tabla 6a. Duración de las actividades módulo 1, solución 1 a 25.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----

[illegible]

Tabla 6a. Duración de las actividades módulo 1, solución 25 a 50.

Solución	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
A1	10	6	6	6	6	6	6	6	6	6	10	6	6	6	10	6	9	6	6	6	6	6	6	6	9
A2	98	98	98	98	98	98	98	98	98	98	98	98	98	98	98	97	98	98	98	98	98	98	98	98	98
A3	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90
A4	59	51	51	56	57	59	59	49	53	54	58	58	59	59	58	59	59	49	50	51	56	57	59	52	58
A5	78	78	78	78	78	78	78	78	78	78	78	78	78	78	78	78	78	78	78	78	78	78	78	78	78
A6	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26
A7	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39
A8	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80
A9	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	55	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60
A10	60	60	59	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	59	60	60	60	55	60	60	60	60
A11	295	295	295	295	295	295	295	295	295	295	295	295	295	295	295	295	295	295	295	295	295	295	295	295	295
A12	45	45	42	45	45	45	45	39	39	39	39	39	41	42	45	45	42	39	42	45	42	42	42	38	39
A13	35	34	34	34	31	34	32	34	34	34	34	34	35	33	33	35	31	34	34	31	34	34	34	34	34
A14	129	119	114	119	129	129	129	123	123	123	123	113	123	120	120	100	110	114	114	114	114	114	114	120	114
A15	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
A16	168	188	189	188	189	188	189	210	210	210	210	231	231	240	240	262	262	284	284	284	284	284	284	306	306
A17	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12

Adicionalmente la tabla 6a consolida la duración de las 17 actividades de cada solución cuasi optima del frente de Pareto. El comportamiento de este conjunto de duraciones es de tipo decreciente para las actividades que se encuentran dentro de la ruta crítica y creciente para las que no. Este comportamiento se explica por el hecho de que se están evaluando dos funciones de minimización de tiempo y costo, lo que hace que el algoritmo acelere las actividades que tienen relación directa con la terminación del proyecto (las que están en la ruta crítica) y retarde las que no, con el fin de disminuir el costo. Las soluciones van mejorando a medida que las iteraciones avanzan hasta determinar las 50 poblaciones.

El frente de Pareto con las soluciones cuasi optimas de los módulos 2, 3 y 4 se pueden observar en las figuras 17, 18 y 19 respectivamente. El correspondiente análisis e interpretación se encuentra en anexos.

Figura 17. Frente de Pareto módulo 2

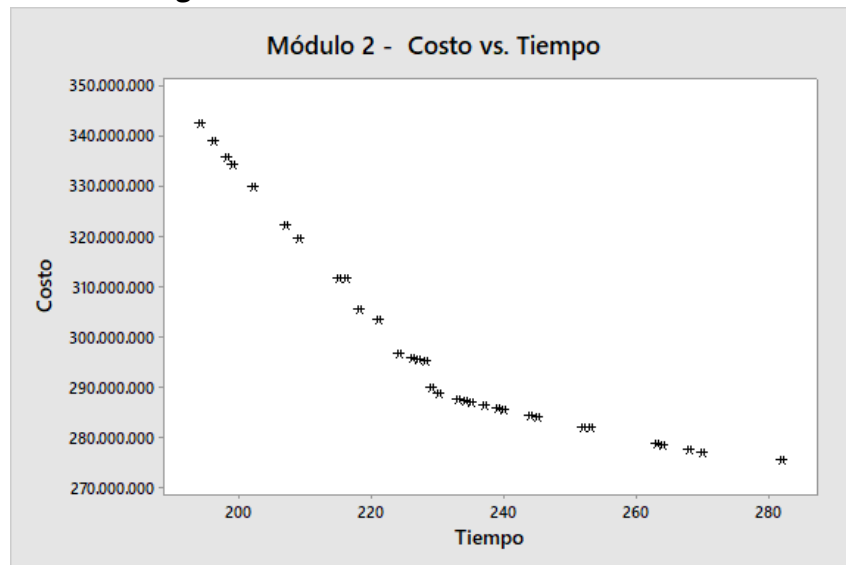


Figura 18. Frente de Pareto módulo 3

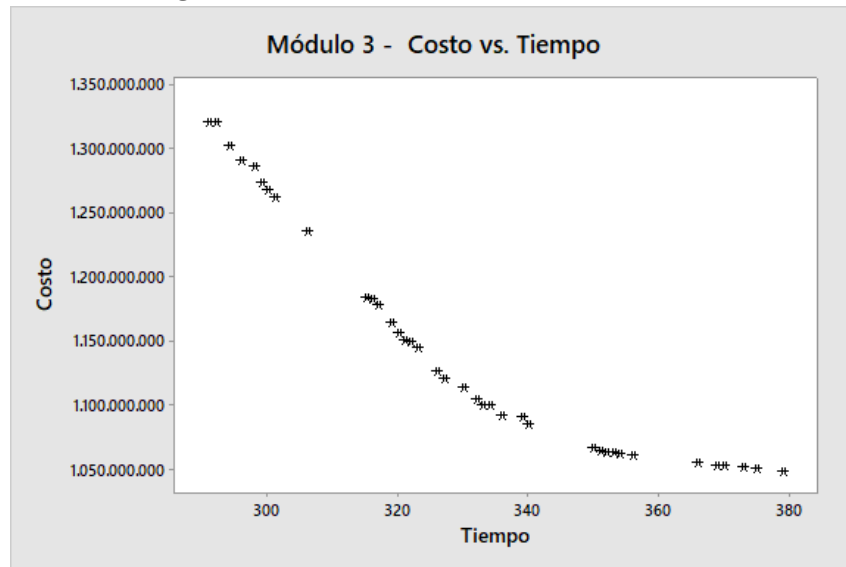
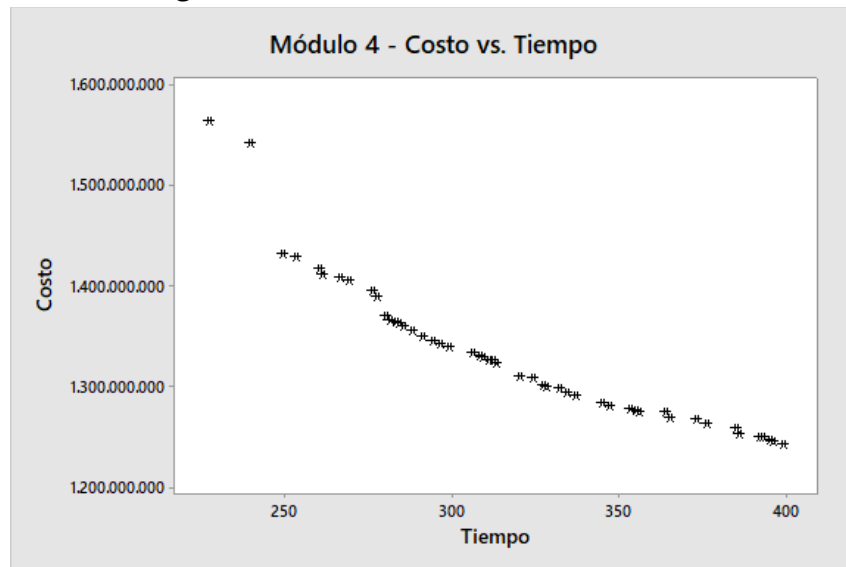


Figura 19. Frente de Pareto módulo 4



4.5 CONCLUSIONES

Uno de los puntos cruciales para el óptimo funcionamiento del algoritmo radica en que el diagrama de red debe estar correctamente elaborado, de lo contrario el frente de Pareto no se construirá con soluciones reales debido a que el algoritmo lee las dependencias erróneas entre actividades y toma la ruta crítica equivocada.

Una de las particularidades del proyecto Construcción de la Etapa I – Sede Universitaria Zarzal es que los diagramas de red del proyecto estaban diseñados por fases paralelas denominadas módulos, por tal razón las precedencias que se llamaron dependencias en el algoritmo no tenían lógica de secuencia al unificar los

módulos, por consiguiente, el diagrama consolidado de red no tuvo validez. Por estas circunstancias se aplicó el algoritmo de forma independiente.

Con el fin de presentar una idea global de los beneficios de solucionar el problema del DTCTP en el proyecto de aplicación, se escogieron 4 soluciones según los criterios de los investigadores y se unificaron, obteniendo tiempos y costos totales directos e indirectos del proyecto los cuales se pueden comparar con la programación inicial.

Tabla 7. Comparativo

PROPUESTA SOLUCIÓN			PROGRAMACIÓN INICIAL	
MÓDULO	TIEMPO DE TERMINACIÓN	COSTO DIRECTO	TIEMPO DE TERMINACIÓN	COSTO DIRECTO
AULAS	361	\$ 3.923.120.143	513	\$ 3.623.752.600
CAFETERIA-RESTAURANTE	282	\$ 275.446.399	281	\$ 338.643.801
GRADERIAS-VESTIER-PISCINA	356	\$ 1.060.172.050	336	\$ 1.231.212.819
ZONAS EXTERIORES	356	\$ 1.274.412.559	299	\$ 1.539.864.126
<i>Costo Indirecto</i>		\$ 1.654.460.473		\$ 2.351.075.409
<i>Total Costo directo</i>		\$ 6.533.151.150		\$ 6.733.473.346
<i>Total Costo</i>		\$ 8.187.611.623		\$ 9.084.548.755
<i>Total Tiempo terminación</i>		361		513
VARIACIÓN				
MÓDULO	Tiempo		Costo	
AULAS	152		\$ 299.367.542	
CAFETERIA-RESTAURANTE	-1		\$ 63.197.402	
GRADERIAS-VESTIER-PISCINA	-20		\$ 171.040.769	
ZONAS EXTERIORES	-57		\$ 265.451.568	

Contextualizando la tabla 7, se observa que los investigadores escogieron para el módulo de Aulas la solución que mejor tiempo acelerado obtuvo en la ejecución con un valor de 361, lo que indica que se aceleró 152 periodos. No obstante, para los siguientes módulos escogieron las soluciones más cercanas (por la izquierda) al tiempo de terminación del módulo 1, por consiguiente, estos módulos se retrasaron en algunos periodos, obteniendo un ahorro, situación contraria a los recursos que se adicionaron al módulo 1 para acelerar las actividades. También se puede observar en la tabla 7 el ahorro del costo indirecto que se obtuvo al reducir la ruta crítica desde el periodo 513 hasta el 361, pasando de \$ 2.351.075.409 a \$1.654.460.470. En total el proyecto con la nueva programación y planeación de actividades durará 361 días a un costo de total \$8.197.611.623 que comparando con la programación inicial terminará 152 días antes y se tendrá un ahorro de \$ 896.937.132.

Ya que con la solución del problema del DTCTP mediante el algoritmo genético NSGA-II no se encuentra un óptimo sino frentes de Pareto con soluciones cuasi óptimas donde una solución es mejor que otra en alguno de sus objetivos. De lo anterior se puede definir que la solución que se escoja del frente de Pareto depende del escenario que rodea a los gerentes del proyecto, dado que ellos tienen el conocimiento de los nuevos ajustes que se le deben hacer al proyecto, con el fin de cumplir fecha entrega, costos presupuestados y alcance del proyecto.

Para dar solución al DTCTP simulando un escenario que acelere al máximo la duración del proyecto ejecutado por fases paralelas, es necesario acelerar al máximo el módulo que menor flexibilidad de compresión tenga. Cuando se haya determinado este punto (ruta crítica), se acelera las demás fases de tal forma que el valor de cada una este lo más próximo por debajo del valor de la ruta crítica. Cualquier recurso que se adicione de forma desproporcionada por debajo de este límite será un costo innecesario.

CONCLUSIONES

Antes de aplicar el algoritmo genético NSGA-II es indispensable conocer la naturaleza del método de aceleración de proyectos con todos los criterios que la conforman, entre los cuales se pueden mencionar cálculo de ruta crítica (CPM), diagrama de red y conceptos de modelación matemática.

El problema DTCTP al considerarse de forma determinista o estocástica es posible solucionarlo mediante métodos exactos y no exactos, que a la vez pueden ser de tipo mono objetivo y multi objetivo. La dificultad de su solución yace en el número de actividades que componen el proyecto. Adicionalmente en la investigación sobre el DTCTP los casos prácticos para métodos no exactos o heurísticos solo se han aplicado de forma determinística, se recomienda usar este algoritmo para modelos estocásticos con un mayor número de actividades.

Se contextualizó el sector de la construcción en el Valle del Cauca y en los municipios aledaños al proyecto con el fin de conocer y profundizar la dinámica del sector construcción en esta región. Desde el punto de vista de la empleabilidad al acelerar las actividades se incurre en el uso de más personal, recursos y materiales. Recursos de mano de obra que deben ser tenidos en cuenta según la localización del proyecto ya que no siempre están disponibles y debe existir un margen aceptable entre la relación de tiempo y disponibilidad de recursos en la ejecución de las actividades.

Se pudo determinar que en los proyectos de construcción el número de metros licenciados no es proporcional al número de actividades esto depende del rubro de la construcción y su complejidad. Es decir, el rubro de vivienda y edificaciones está constituido por actividades repetitivas lo cual hace posible que se genere un módulo y se replique, mientras que el rubro de obras civiles y pesadas por su complejidad muestran la necesidad de desglosar en más actividades la planeación y programación del proyecto.

Respecto a las soluciones del algoritmo genético se obtuvo más diversidad con un número de genes a mutar mayores a 3 y con un valor de semilla aleatoria mayor que 4 en un rango de 1 a 9. Esto se pudo evidenciar por las soluciones únicas que se dieron en los resultados de los módulos durante las pruebas.

Con la aplicación del algoritmo NSGA-II a la obra civil Construcción de la Etapa I – Sede Universitaria Zarzal a partir de la programación inicial del proyecto se obtiene un frente de Pareto con soluciones cuasi óptimas (pares de tiempo-costos) de las que se puede disponer para reducir o demorar la duración del proyecto a un mínimo costo.

BIBLIOGRAFÍA

- Abderisak, A., Josephson, E., & Göran, L. (2015). Implications of Cost Overruns and Time Delays on Major Public Construction Projects. In *Proceedings of the 19th International Symposium on Advancement of Construction Management and Real Estate* (pp. 747–758). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-46994-1_61
- Ahsan, K., & Gunawan, I. (2010). Analysis of cost and schedule performance of international development projects. *International Journal of Project Management*, 28(1), 68–78. <https://doi.org/10.1016/J.IJPROMAN.2009.03.005>
- Akkan, C. (2005). Network decomposition-based benchmark results for the discrete time-cost tradeoff problem.
- Anagnostopoulos, K. P., & Kotsikas, L. (2010). Experimental evaluation of simulated annealing algorithms for the time–cost trade-off problem. *Applied Mathematics and Computation*, 217(1), 260–270. <https://doi.org/10.1016/J.AMC.2010.05.056>
- Assadipour, G., & Iranmanesh, H. (2010). The Discret Time, Cost and Quality Trade-Off Problem In Project Scheduling: An Efficient Solution Method Based On Celde Algorithm. *University of Tehran*, 5(1976), 265–288.
- Assaf, S. A., & Al-Hejji, S. (2006). Causes of delay in large construction projects. *International Journal of Project Management*, 24(4), 349–357. <https://doi.org/10.1016/J.IJPROMAN.2005.11.010>
- Ballestín, F., & Leus, R. (2009). Resource-Constrained Project Scheduling for Timely Project Completion with Stochastic Activity Durations. *Production and Operations Management Society*, 18(4), 459–474. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.1155/2015/586087>
- Camacol. (2018). BOLETÍN ECONÓMICO REGIONAL VALLE I SEMESTRE 2018 BALANCE ACTIVIDAD EDIFICADORA REGIONAL : PRIMER SEMESTRE 2018.
- Clements, G. (2013). *Administración Exitosa De Proyectos*. *Journal of Chemical Information and Modeling* (Vol. 53). <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Construdata. (n.d.). Retrieved October 26, 2018, from http://www.construdata.com/BancoConocimiento/o/oit_colombia_caracteristicas/oit_colombia_caracteristicas.asp
- Correa, C. A., Bolaños, A., & Molina, A. (2008). Algoritmo multiobjetivo NSGA-II aplicado al problema de la mochila. *Scientia Et Technica*, 2(39), 206–211.
- Cuartas, B. (2009). METODOLOGÍA PARA LA OPTIMIZACIÓN DE MÚLTIPLES OBJETIVOS BASADA EN AG Y USO DE PREFERENCIAS. Retrieved April 2, 2019, from <https://docplayer.es/36689850-Metodologia-para-la-optimizacion-de-multiples-objetivos-basada-en-ag-y-uso-de-preferencias-bibiana-andrea-cuartas-torres.html>
- DANE. (2018a). Boletín técnico Estadísticas de licencias de construcción, 1–32. Retrieved from https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/boletines/licencias/bol_lic_ago18.pdf
- DANE. (2018b). *Boletín técnico Indicadores económicos alrededor de la construcción-IEAC Primer trimestre de 2018 Indicadores Económicos Alrededor de la Construcción-IEAC*.
- DANE. (2018c). *Boletín técnico Indicadores económicos alrededor de la construcción (IEAC) Segundo trimestre de 2018 Indicadores Económicos Alrededor de la Construcción (IEAC)*.

- DANE. (2018d). Indicadores Económicos Alrededor de la Construcción - IEAC. DANE, 29. Retrieved from http://www.dane.gov.co/files/investigaciones/boletines/pib_const/Bol_ieac_ltrim18.pdf
- De, P., Dunne, E. J., Ghosh, J. B., & Wells, C. E. (1997). Complexity of the Discrete Time-Cost Tradeoff Problem for Project Networks. *Operations Research*, 45(2), 302–306. <https://doi.org/10.1287/opre.45.2.302>
- Değirmenci, G., & Azizoğlu, M. (2013). Branch and bound based solution algorithms for the budget constrained discrete time/cost trade-off problem. *Journal of the Operational Research Society*, 64(10), 1474–1484. <https://doi.org/10.1057/jors.2012.14>
- Demeulemeester, E. L., Herroelen, W. S., & Elmaghraby, S. E. (1996). Optimal procedures for the discrete time/cost trade-off problem in project networks. *European Journal of Operational Research*, 88(1), 50–68. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(94\)00181-2](https://doi.org/10.1016/0377-2217(94)00181-2)
- Demeulemeester, E., Reyck, B., & Herroelen, W. (1998). RESOURCE-CONSTRAINED PROJECT SCHEDULING: A SURVEY OF RECENT DEVELOPMENTS, 25(4), 1–24. [https://doi.org/10.1016/S0305-0548\(97\)00055-5](https://doi.org/10.1016/S0305-0548(97)00055-5)
- Eshtehardian, E., Afshar, A., & Abbasnia, R. (2009). Fuzzy-based MOGA approach to stochastic time–cost trade-off problem. *Automation in Construction*, 18(5), 692–701. <https://doi.org/10.1016/J.AUTCON.2009.02.001>
- González, M. J. (2013). La Lógica Fuzzy y su Aplicación en la Limitación de Recursos, 93.
- Gray, C., & Larson, E. (2009). Administración de proyectos, 6.
- Gutjahr, W. J., Strauss, C., & Wagner, E. (2000). A Stochastic Branch-and-Bound Approach to Activity Crashing in Project Management. *INFORMS Journal on Computing*, 12(2), 125–135. <https://doi.org/10.1287/ijoc.12.2.125.11894>
- Hadjiconstantinou, E., & Klerides, E. (2010). A new path-based cutting plane approach for the discrete time-cost tradeoff problem. *Computational Management Science*, 7(3), 313–336. <https://doi.org/10.1007/s10287-009-0115-6>
- Hafizoğlu, A. B., & Azizoğlu, M. (2009). Linear programming based approaches for the discrete time/cost trade-off problem in project networks. *Journal of the Operational Research Society*, 61(4), 676–685. <https://doi.org/10.1057/jors.2009.20>
- Hazir, O. (2008). MODELS AND ALGORITHMS FOR DETERMINISTIC AND ROBUST DISCRETE TIME/COST TRADE-OFF PROBLEMS. *The Visual Computer*, 24(3), 155–172.
- Hazir, Ö., Erel, E., & Gunalay, Y. (2011). Robust optimization models for the discrete time/cost trade-off problem. *International Journal of Production Economics*, 130(1), 87–95. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2010.11.018>
- Instituto Vasco de Estadística. (2017). Tipo de obra (Construcción). Retrieved October 25, 2018, from http://www.eustat.eus/documentos/opt_Cy/tema_8/elem_1674/definicion.html
- Kaveh, A., & Mahdavi, V. R. (2015). Colliding bodies optimization: Extensions and applications. *Colliding Bodies Optimization: Extensions and Applications*, 1–284. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-19659-6>
- Ke, H., Ma, W., & Chen, X. (2012). Modeling stochastic project time–cost trade-offs with time-dependent activity durations. *Applied Mathematics and Computation*, 218(18), 9462–9469. <https://doi.org/10.1016/J.AMC.2012.03.035>
- Ke, H., Ma, W., & Ni, Y. (2009). Optimization models and a GA-based algorithm for stochastic

- time-cost trade-off problem. *Applied Mathematics and Computation*, 215(1), 308–313. <https://doi.org/10.1016/j.amc.2009.05.004>
- Kelley, J., & Walker, M. (1959). Critical-Path Planning and Scheduling | IEEE Computer Society Digital Library. Retrieved March 7, 2019, from <https://www.computer.org/csdl/proceedings-article/afips/1959/50550160/12OmNym2c66>
- Laslo, Z. (2003). Activity time–cost tradeoffs under time and cost chance constraints. *Computers & Industrial Engineering*, 44(3), 365–384. [https://doi.org/10.1016/S0360-8352\(02\)00214-0](https://doi.org/10.1016/S0360-8352(02)00214-0)
- Li, H., Xu, Z., Xiong, L., & Liu, Y. (2015). Robust Proactive Project Scheduling Model for the Stochastic Discrete Time / Cost Trade-Off Problem. *Hindawi Publishing Corporation*, 2015. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.1155/2015/586087>
- Meyer, L., & Shaffer, L. (1965). The Critical-path Method. Retrieved March 7, 2019, from https://books.google.com.co/books/about/The_Critical_path_Method.html?id=6SJYAAAAMAAJ&redir_esc=y
- Mitchell, G., & Klastorin, T. (2007). An effective methodology for the stochastic project compression problem. *IIE Transactions (Institute of Industrial Engineers)*, 39(10), 957–969. <https://doi.org/10.1080/07408170701315347>
- Moussourakis, J., & Haksever, C. (2010). Project Compression with Nonlinear Cost Functions, (February), 251–260.
- Narváez, P. A., López-Lezama, J. M., & Velilla, E. (2015). Ubicación de Generación Distribuida para Minimización de Pérdidas Usando un Algoritmo Genético Híbrido. *Información Tecnológica*, 26(3), 123–132. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642015000300016>
- Project Management Institute. (2013). *Guía de los fundamentos para la dirección de proyectos (guía del PMBOK®)*. Project Management Institute, Inc. <https://doi.org/HD69.P75G8452013658.4'04--dc232012046112>
- Rojas, L. F., López, J. M., & Muñoz, N. (2016). Asignación Óptima de Presupuesto para Mejoramiento de la Calidad del Servicio en Sistemas de Distribución usando Algoritmo Genético No-Dominado II (NSGA-II) y un Algoritmo Memético. *Información Tecnológica*, 27(1), 115–126. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642016000100013>
- Sambasivan, M., & Soon, Y. W. (2007). Causes and effects of delays in Malaysian construction industry. *International Journal of Project Management*, 25(5), 517–526. <https://doi.org/10.1016/J.IJPROMAN.2006.11.007>
- Santana, L. V., & Coello, C. (2006). Una introducción a la Computación Evolutiva y alguna de sus aplicaciones en Economía y Finanzas. *An Introduction to Evolutionary Computation and Some of Its Applications in Economics and Finance*, 2(December), 3–26.
- Shahriari, M. (2016). Multi-objective optimization of discrete time–cost tradeoff problem in project networks using non-dominated sorting genetic algorithm. *Journal of Industrial Engineering International*, 12(2), 159–169. <https://doi.org/10.1007/s40092-016-0148-8>
- Shi, L., Wang, M., Tang, L., & Nie, Y. (2000). Genetic algorithm for the discrete time/cost trade-off problem in project networks. Retrieved March 8, 2019, from https://www.researchgate.net/publication/296809167_Genetic_algorithm_for_the_discrete_timecost_trade-off_problem_in_project_networks
- Skutella, M. (1998). APPROXIMATION ALGORITHMS FOR THE DISCRETE TIME-COST TRADEOFF PROBLEM. *MATHEMATICS OF OPERATIONS RESEARCH*, 23(4), 909–929.

- Sonmez, R., & Bettemir, Ö. H. (2012). A hybrid genetic algorithm for the discrete time-cost trade-off problem. *Expert Systems with Applications*, 39(13), 11428–11434. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2012.04.019>
- Tareghian, H. R., & Taheri, S. H. (2006). On the discrete time, cost and quality trade-off problem. *Applied Mathematics and Computation*, 181(2), 1305–1312. <https://doi.org/10.1016/j.amc.2006.02.029>
- Tareghian, H. R., & Taheri, S. H. (2007). A solution procedure for the discrete time, cost and quality tradeoff problem using electromagnetic scatter search. *Applied Mathematics and Computation*, 190(2), 1136–1145. <https://doi.org/10.1016/j.amc.2007.01.100>
- Tavares, L. . (1990). A multi-stage non-deterministic model for project scheduling under resources constraints. *European Journal of Operational Research*, 49(1), 92–101. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(90\)90123-S](https://doi.org/10.1016/0377-2217(90)90123-S)
- Vanhoucke, M. (2003). NEW COMPUTATIONAL RESULTS FOR THE DISCRETE TIME / COST TRADE - OFF PROBLEM WITH TIME -SWITCH CONSTRAINTS. *HOVENIERSBERG*, (June).
- Vanhoucke, M., Demeulemeester, E., & Herroelen, W. (2002). Discrete time/cost trade-offs in project scheduling with time-switch constraints. *Journal of the Operational Research Society*, 53(7), 741–751. <https://doi.org/10.1057/palgrave.jors.2601351>
- Wuliang, P., & Chengen, W. (2009). A multi-mode resource-constrained discrete time–cost tradeoff problem and its genetic algorithm based solution. *International Journal of Project Management*, 27(6), 600–609. <https://doi.org/10.1016/J.IJPROMAN.2008.10.009>
- Xu, J., Zheng, H., Zeng, Z., Wu, S., & Shen, M. (2012). Discrete time–cost–environment trade-off problem for large-scale construction systems with multiple modes under fuzzy uncertainty and its application to Jinping-II Hydroelectric Project. *International Journal of Project Management*, 30(8), 950–966. <https://doi.org/10.1016/J.IJPROMAN.2012.01.019>
- Yang, Y., Chen, Z., Valerdi, R., & Boehm, B. (2008). Effect of Schedule Compression on Project Effort, 2000(Cii).
- Yin, S., & Wang, G. (2014). Data-driven design of robust fault detection system for wind turbines. *Mechatronics*, 24(4), 298–306. <https://doi.org/10.1016/J.MECHATRONICS.2013.11.009>

ANEXOS

Tabla 4b. Resultados módulo 2 de tiempo-costo y valores de compresión y retraso en actividades.

No	Tiempo	Costo	Periodos Acelerados	Periodos de Retraso	No	Tiempo	Costo	Periodos Acelerados	Periodos de Retraso
1	194	\$ 342.456.796	44	41	26	233	\$ 287.522.207	24	60
2	194	\$ 342.456.796	44	41	27	233	\$ 287.522.207	24	60
3	194	\$ 342.456.796	44	41	28	233	\$ 287.522.207	24	60
4	196	\$ 339.111.360	42	41	29	233	\$ 287.522.207	24	60
5	198	\$ 335.862.042	40	41	30	234	\$ 287.161.820	24	61
6	199	\$ 334.272.561	39	41	31	234	\$ 287.161.820	24	61
7	202	\$ 329.871.739	36	39	32	234	\$ 287.161.820	24	61
8	207	\$ 322.357.348	31	41	33	234	\$ 287.161.820	24	61
9	209	\$ 319.589.386	29	41	34	235	\$ 287.024.042	23	61
10	215	\$ 311.695.650	25	43	35	237	\$ 286.266.970	20	60
11	216	\$ 311.557.873	24	43	36	239	\$ 285.604.044	19	61
12	218	\$ 305.545.411	26	47	37	239	\$ 285.604.044	19	61
13	221	\$ 303.437.346	24	48	38	240	\$ 285.305.882	18	61
14	224	\$ 296.630.477	26	53	39	244	\$ 284.155.758	14	61
15	226	\$ 295.853.951	24	53	40	245	\$ 283.878.553	13	61
16	226	\$ 295.853.951	24	53	41	252	\$ 282.047.238	6	61
17	226	\$ 295.853.951	24	53	42	253	\$ 281.909.460	5	61
18	226	\$ 295.853.951	24	53	43	263	\$ 278.708.287	6	72
19	227	\$ 295.437.812	24	54	44	264	\$ 278.439.300	6	73
20	227	\$ 295.437.812	24	54	45	268	\$ 277.415.104	6	77
21	228	\$ 295.077.425	24	55	46	270	\$ 276.932.655	6	79
22	228	\$ 295.077.425	24	55	47	270	\$ 276.932.655	6	79
23	228	\$ 295.077.425	24	55	48	282	\$ 275.446.399	0	85
24	229	\$ 289.969.659	26	58	49	282	\$ 275.446.399	0	85
25	230	\$ 288.714.872	26	59	50	282	\$ 275.446.399	0	85

Para el módulo 2 la ruta crítica original se dio en las actividades A1, A2, A3, A5, A6, A7, A9, A10, A11, (figura 14) con un total de 281 periodos y un costo directo de \$ 338.643.801, valores definidos para la terminación del módulo en su totalidad véase tabla 2. Ahora al compararse con la solución más comprimida de la tabla 4b encontrada por el algoritmo, se puede notar la reducción de 87 periodos para el total del proyecto con un valor extra de \$ 3.812.995.

La tendencia de los periodos acelerados y retardados expuestos en la tabla 4b para cada solución, se realiza a partir de la ruta crítica que es tomado como un valor central. Al analizar las tres últimas soluciones de la tabla 4b estas no tienen días comprimidos, ni valores normales de tiempo, lo que significa que las actividades tomaron valores de tiempo extendido o retardado, en consecuencia, el proyecto es mucho más económico que su costo normal. Sin embargo, a medida que el tiempo de terminación del módulo disminuye en las ejecuciones anteriores (50-n), el costo se eleva y los días retardados disminuyen, compensando el tiempo con el costo.

Tabla 6b. Duración de las actividades módulo 2, solución 1 a 25.

Solución	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
A1	6	6	6	6	6	6	6	6	6	7	7	6	7	6	8	8	8	8	9	9	10	10	10	6	6
A2	42	42	42	44	46	47	50	55	57	62	62	66	67	72	72	72	72	72	72	72	72	72	72	77	78
A3	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75
A4	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42
A5	77	77	77	77	77	77	77	77	77	77	77	77	77	77	77	77	77	77	77	77	77	77	77	77	77
A6	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13
A7	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
A8	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45
A9	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33
A10	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26
A11	20	20	20	20	20	20	18	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
A12	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	15	14	15	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14
A13	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
A14	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15

Tabla 6b. Duración de las actividades módulo 2, solución 25 a 50.

Solución	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
A1	9	9	9	9	10	10	10	10	10	9	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
A2	78	78	78	78	78	78	78	78	78	78	78	78	78	78	78	78	78	78	78	78	78	78	78	78	78
A3	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75
A4	42	42	42	42	42	42	42	42	42	46	47	47	48	52	53	60	60	71	72	76	78	78	78	78	78
A5	77	77	77	77	77	77	77	77	77	77	77	77	77	77	77	77	77	77	77	77	77	77	77	77	77
A6	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13
A7	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
A8	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45
A9	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33
A10	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26
A11	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
A12	14	14	14	14	14	14	14	14	15	14	14	14	14	14	14	15	14	14	14	14	14	14	26	26	26
A13	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
A14	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15

Contextualizando los resultados del módulo 3 que cuenta con 19 actividades, un costo directo \$1.231.212.819 y una ruta crítica de 336 días (véase tabla 2). Se observa que la solución que arrojo el algoritmo con la menor duración del módulo fue de 291 días a un costo de \$ 1.320.033.814.

La solución de 291 días como mejor resultado para acelerar la terminación del módulo, tomo la ruta crítica A1, A2, A3, A4, A6, A7, A8, A13, A14, A15, A16, A18, A19. Cabe mencionar que algunas actividades se mantienen normales en dos casos, el primero porque algunas actividades por su naturaleza no se pueden acelerar ni demorar como es el caso de la actividad 10, 17, 13 y 3. Y la segunda, porque dependiendo su costo, el algoritmo evalúa la ruta crítica y determina la opción de dejarla igual a su valor normal, en este módulo no se dio esta situación.

Tabla 4c. Resultados módulo 3 de tiempo-costo y valores de compresión y retraso en actividades.

No	Tiempo	Costo	Periodos Acelerados	Periodos de Retraso	No	Tiempo	Costo	Periodos Acelerados	Periodos de Retraso
1	291	\$ 1.320.033.814	46	23	26	332	\$ 1.104.075.309	25	43
2	292	\$ 1.319.376.266	45	23	27	333	\$ 1.099.416.366	25	44
3	294	\$ 1.301.536.211	43	23	28	334	\$ 1.098.758.818	24	44
4	296	\$ 1.289.646.276	41	23	29	336	\$ 1.091.585.858	24	46
5	298	\$ 1.285.537.943	41	23	30	339	\$ 1.089.669.348	21	46
6	299	\$ 1.272.448.807	38	23	31	340	\$ 1.084.865.192	20	46
7	300	\$ 1.266.881.411	37	23	32	350	\$ 1.065.554.854	17	53
8	301	\$ 1.261.394.575	36	23	33	351	\$ 1.063.276.220	17	54
9	306	\$ 1.235.128.593	31	23	34	352	\$ 1.062.618.672	16	54
10	315	\$ 1.182.984.224	28	29	35	352	\$ 1.062.618.672	16	54
11	315	\$ 1.182.984.224	28	29	36	353	\$ 1.061.980.016	15	54
12	316	\$ 1.182.326.676	27	29	37	353	\$ 1.061.980.016	15	54
13	317	\$ 1.177.432.350	27	30	38	354	\$ 1.061.359.710	14	54
14	319	\$ 1.163.993.809	28	33	39	354	\$ 1.061.359.710	14	54
15	320	\$ 1.155.130.779	28	34	40	356	\$ 1.060.172.050	12	54
16	321	\$ 1.149.883.654	28	35	41	366	\$ 1.054.269.027	8	60
17	321	\$ 1.149.883.654	28	35	42	369	\$ 1.052.656.916	6	61
18	321	\$ 1.149.883.654	28	35	43	370	\$ 1.052.159.153	7	63
19	322	\$ 1.149.226.106	27	35	44	373	\$ 1.050.613.968	6	65
20	323	\$ 1.144.331.781	27	36	45	373	\$ 1.050.613.968	6	65
21	326	\$ 1.125.152.469	28	40	46	373	\$ 1.050.613.968	6	65
22	327	\$ 1.120.493.526	28	41	47	373	\$ 1.050.613.968	6	65
23	327	\$ 1.120.493.526	28	41	48	375	\$ 1.049.810.194	4	65
24	330	\$ 1.112.663.018	27	43	49	375	\$ 1.049.810.194	4	65
25	330	\$ 1.112.663.018	27	43	50	379	\$ 1.047.859.272	3	68

Tabla 6c. Duración de las actividades módulo 3, solución 1 a 25.

[illegible]

Tabla 6c. Duración de las actividades módulo 3, solución 25 a 50.

Solución	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
A1	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	9	7	10	10	10	10	7	7	10
A2	77	78	78	78	78	78	78	78	78	78	78	78	78	78	78	78	78	78	78	78	78	78	78	78	78
A3	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75
A4	21	21	22	21	24	22	21	21	22	22	23	23	24	24	26	36	36	39	39	39	39	39	39	39	39
A5	56	56	56	56	56	56	56	56	56	56	56	56	56	56	56	56	56	56	56	56	56	56	56	56	56
A6	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13
A7	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
A8	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25
A9	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
A10	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13
A11	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
A12	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
A13	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60
A14	18	18	18	18	18	21	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33
A15	4	4	4	7	7	7	6	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
A16	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	12	12	13
A17	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
A18	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
A19	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10

El módulo 4 fue programado para 307 periodos con un costo directo de \$1.539.864.126. Es el módulo con la tercera duración más larga en la programación inicial, con la ruta crítica comprendida por las actividades A1, A2, A3, A4, A5, y A38 la cual se mantiene para la mejor solución encontrada por el algoritmo con un tiempo de 227 periodos y un costo directo total de \$ 1.563.384.350, con una disminución en el tiempo de terminación de 80 periodos y costo excedente respecto al presupuestado de \$ 23.520.224. No obstante, la comparación se está haciendo frente al valor del costo directo, pero que sucede si se agrega el costo indirecto (\$4.582.993/periodo), en este caso el costo presupuestado ascendería a \$2.946.842.977 y la solución a \$2.603.723.761 lo que representa un ahorro de \$343.119.216.

La aceleración de proyectos debe planearse y justificarse de forma tal que los resultados obtenidos terminen beneficiando los alcances definidos en la planeación del proyecto. Como se ha ilustrado en los resultados anteriores el dinero se vuelve muy volátil y susceptible al cambio de tiempos, por ejemplo, en el módulo 4 al encontrar una solución de 249 y reducirla a 227 (22 periodos) se está incurriendo en un incremento de costos de \$ 132.293.354 (véase figura 19 los datos atípicos). Por ello la importancia de hacer que el margen de incremento se compense con la retribución de los beneficios de terminar el proyecto en el tiempo establecido o antes si es el caso.

Tabla 4d. Resultados módulo 4 de tiempo-costo y valores de compresión y retraso en actividades.

No	Tiempo	Costo	Periodos Acelerados	Periodos de Retraso	No	Tiempo	Costo	Periodos Acelerados	Periodos de Retraso
1	227	\$ 1.563.384.350	91	45	26	313	\$ 1.322.282.023	33	97
2	239	\$ 1.541.463.540	73	46	27	320	\$ 1.310.172.212	34	105
3	249	\$ 1.431.090.996	71	75	28	324	\$ 1.307.578.763	31	108
4	253	\$ 1.429.326.364	65	72	29	327	\$ 1.300.728.393	33	115
5	260	\$ 1.416.515.732	58	71	30	328	\$ 1.299.466.530	33	114
6	261	\$ 1.411.656.653	58	69	31	332	\$ 1.297.299.261	33	116
7	266	\$ 1.408.803.048	51	67	32	334	\$ 1.293.720.586	34	119
8	269	\$ 1.404.410.371	50	72	33	337	\$ 1.291.207.197	30	117
9	276	\$ 1.394.690.055	51	80	34	345	\$ 1.283.778.225	22	120
10	277	\$ 1.389.713.809	56	80	35	347	\$ 1.280.983.246	22	120
11	280	\$ 1.370.162.416	49	80	36	353	\$ 1.277.663.061	14	119
12	281	\$ 1.365.035.216	55	89	37	355	\$ 1.275.319.605	13	121
13	283	\$ 1.363.946.310	53	87	38	356	\$ 1.274.412.559	13	120
14	284	\$ 1.361.919.085	54	89	39	364	\$ 1.274.323.743	2	118
15	285	\$ 1.359.648.381	53	91	40	365	\$ 1.268.240.583	2	120
16	288	\$ 1.355.094.114	48	88	41	373	\$ 1.267.027.478	1	127
17	291	\$ 1.349.734.562	53	95	42	376	\$ 1.262.963.440	3	132
18	294	\$ 1.344.504.055	49	96	43	385	\$ 1.257.610.431	4	139
19	296	\$ 1.341.421.234	48	97	44	386	\$ 1.252.990.716	1	139
20	299	\$ 1.338.524.294	49	99	45	392	\$ 1.250.143.277	2	146
21	306	\$ 1.333.866.142	37	95	46	393	\$ 1.248.817.830	3	151
22	308	\$ 1.330.278.519	38	99	47	395	\$ 1.246.129.948	3	153
23	309	\$ 1.329.186.031	34	96	48	396	\$ 1.245.285.168	1	148
24	311	\$ 1.326.300.469	33	96	49	399	\$ 1.242.138.871	0	151
25	312	\$ 1.326.296.912	32	95	50	399	\$ 1.242.138.871	0	151

Revisando las tablas y las figuras antes presentadas de los resultados, se observa que no se ha ingresado el criterio del costo indirecto para ningún módulo, este criterio se presenta en la tabla 8 y solo se aplicó al módulo 1, ya que este módulo presenta la ruta crítica más larga en comparación con los demás. El costo indirecto es un valor constante que se multiplica al número de periodos de terminación o ruta crítica, para el proyecto este valor es de \$4.582.993. Posteriormente es sumado al costo directo total de las actividades de los cuatro módulos obteniendo de esta forma el costo total del proyecto. Para el mejor tiempo de terminación del proyecto (361 periodos), el valor total del costo indirecto fue de \$1.654.460.304 y para el peor de los casos respecto a la terminación del proyecto (573 periodos), fue de \$2.626.054.721.

Tabla 6d. Duración de las actividades módulo 4, solución 1 a 25.

[illegible]

Tabla 8. Costos indirectos y costos totales del módulo 1 del proyecto.

No	Tiempo	Costo Indirecto	Costo total	No	Tiempo	Costo Indirecto	Costo total
1	361	\$ 1.654.460.304	\$ 3.923.120.143	26	437	\$ 2.002.767.736	\$ 5.279.768.094
2	363	\$ 1.663.626.289	\$ 3.915.560.592	27	445	\$ 2.039.431.677	\$ 5.300.743.995
3	364	\$ 1.668.209.282	\$ 3.909.378.683	28	446	\$ 2.044.014.669	\$ 5.303.919.143
4	367	\$ 1.681.958.259	\$ 3.846.047.129	29	450	\$ 2.062.346.639	\$ 5.303.749.343
5	370	\$ 1.695.707.237	\$ 3.836.069.525	30	452	\$ 2.071.512.624	\$ 5.307.395.917
6	375	\$ 1.718.622.199	\$ 3.752.950.515	31	453	\$ 2.076.095.617	\$ 5.305.970.901
7	378	\$ 1.732.371.177	\$ 3.718.845.401	32	454	\$ 2.080.678.609	\$ 5.308.972.252
8	380	\$ 1.741.537.162	\$ 3.704.526.052	33	465	\$ 2.131.091.527	\$ 5.347.215.782
9	382	\$ 1.750.703.147	\$ 3.677.132.032	34	469	\$ 2.149.423.497	\$ 5.348.528.542
10	385	\$ 1.764.452.125	\$ 3.638.317.544	35	470	\$ 2.154.006.490	\$ 5.349.132.432
11	386	\$ 1.769.035.117	\$ 3.637.808.935	36	478	\$ 2.190.670.430	\$ 5.367.981.638
12	392	\$ 1.796.533.072	\$ 3.549.263.909	37	495	\$ 2.268.581.303	\$ 5.401.565.980
13	399	\$ 1.828.614.020	\$ 3.467.258.173	38	496	\$ 2.273.164.296	\$ 5.401.030.070
14	400	\$ 1.833.197.013	\$ 3.464.572.335	39	505	\$ 2.314.411.228	\$ 5.423.806.964
15	402	\$ 1.842.362.998	\$ 3.437.718.402	40	508	\$ 2.328.160.206	\$ 5.434.726.593
16	406	\$ 1.860.694.968	\$ 3.395.344.655	41	526	\$ 2.410.654.072	\$ 5.469.911.787
17	406	\$ 1.860.694.968	\$ 3.395.344.655	42	530	\$ 2.428.986.042	\$ 5.475.655.198
18	414	\$ 1.897.358.908	\$ 3.360.415.706	43	539	\$ 2.470.232.975	\$ 5.504.891.724
19	419	\$ 1.920.273.871	\$ 3.341.775.978	44	540	\$ 2.474.815.967	\$ 5.504.576.869
20	421	\$ 1.929.439.856	\$ 3.331.480.950	45	541	\$ 2.479.398.960	\$ 5.505.944.860
21	422	\$ 1.934.022.848	\$ 3.328.587.971	46	546	\$ 2.502.313.922	\$ 5.509.467.813
22	426	\$ 1.952.354.818	\$ 3.309.334.407	47	547	\$ 2.506.896.915	\$ 5.508.764.607
23	428	\$ 1.961.520.804	\$ 3.308.071.228	48	549	\$ 2.516.062.900	\$ 5.510.870.178
24	432	\$ 1.979.852.774	\$ 3.286.796.152	49	564	\$ 2.584.807.788	\$ 5.557.589.909
25	433	\$ 1.984.435.766	\$ 3.282.887.375	50	573	\$ 2.626.054.721	\$ 5.571.700.881