

Encabezado: ANÁLISIS DE PROGRAMACIÓN EN PROYECTOS DE CONSTRUCCIÓN

Análisis de Programación en Proyectos de Construcción de Carreteras

Andrés Felipe López Izquierdo

Universidad del Valle

Notas del Autor

Andrés Felipe López Izquierdo, Escuela de Ingeniería Civil y Geomatica, Universidad del Valle

Armando Orobio Q. PhD, Director Responsable

Grupo de investigación GRUA (Investigación Aplicada en Construcción), Gerencia de
Proyectos

Análisis de Programación en Proyectos de Construcción de Carreteras

Andrés Felipe López Izquierdo

Armando Orobio Q. PhD, Director Responsable

Grupo de investigación GRUA (Investigación Aplicada en Construcción), Gerencia de Proyectos

Escuela de Ingeniería Civil y Geomatica. Universidad del Valle, Cali, Colombia.

Resumen

Contar con una adecuada infraestructura vial, contribuye de manera determinante en el desarrollo y crecimiento del país, proporcionando los medios para satisfacer adecuadamente la demanda de transporte, vinculando las regiones aisladas, minimizando impactos económicos, sociales y medioambientales. A pesar de su importancia, en Colombia se identifican problemas de planeación y programación de proyectos de construcción como una de las razones del rezago en la infraestructura vial, a consecuencia de los resultados del fracaso obtenido bajo la forma de demoras en completar el proyecto, con costos que sobrepasa lo presupuestado y en ocasiones no logrando cumplir los estándares de calidad exigido.

El objetivo principal de esta investigación es proponer un procedimiento de análisis de tiempo-costo en la programación de proyectos de construcción de carreteras. Se recopilará información sobre las duraciones y costos de las actividades constructivas y haciendo uso de software especializado, del método de la ruta crítica (CPM) y Simulación Monte Carlo, incluir a la programación de obras del proyecto “tipo” previamente seleccionado, la incertidumbre asociada a la duración de las actividades constructivas, para identificar aquellas actividades constructivas que demanden una mayor cantidad de recursos y poder optimizar los procesos constructivos en tiempos de ejecución obteniendo mejores rendimientos y una mayor utilidad económica.

Palabras claves: Infraestructura vial, Simulación Monte Carlo, Programación de Obras.

TABLA DE CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN.....	1
2	OBJETIVOS	3
2.1	OBJETIVO GENERAL.....	3
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
3	JUSTIFICACIÓN.....	3
4	Antecedentes.....	5
5	MARCO CONCEPTUAL	8
5.1	PROYECTOS DE INFRAESTRUCTURA VIAL.....	8
5.2	SELECCIÓN CASO DE ESTUDIO	8
5.3	ANÁLISIS DE RIESGO E INCERTIDUMBRE.....	9
5.3.1	Análisis cuantitativo de riesgos	9
5.3.2	Análisis cualitativo de riesgos	10
5.4	PRÁCTICAS DE RESPUESTA AL RIESGO	10
5.4.1	Simulación Montecarlo.....	10
5.5	METODO VALOR GANADO (EVM)	12
5.5.1	Índice de desempeño.....	13
5.5.2	Índice de porcentaje de terminación del proyecto	13
5.6	TRATAMIENTO DE DATOS ESTADÍSTICOS.....	14
5.7	ACTUALIZACIÓN DE PRECIOS UNITARIOS.....	15
5.8	AJUSTE DE DISTRIBUCIONES DE PROBABILIDAD.....	16
5.9	CUANDO NO HAY SUFICIENTES DATOS RECOPIADOS	16
5.9.1	Distribución uniforme	17
5.9.2	Distribución normal	17
5.9.3	Distribución triangular	18
5.10	MÉTODO DE LA RUTA CRÍTICA (CPM)	19
5.10.1	Antecedentes históricos.....	19
5.10.2	Estado actual	19
5.10.3	Ventajas del método de la ruta crítica	20
5.11	Soluciones óptimas. Datos tiempo-costos.....	20
6	METODOLOGÍA.....	22
6.1	SELECCIÓN CASO DE ESTUDIO	22

6.2	RECOPIACIÓN DATOS	23
6.3	ACTUALIZACIÓN DE PRECIOS UNITARIOS.....	23
6.4	MODELO DE SIMULACIÓN DURACIÓN Y COSTOS.....	24
6.4.1	Herramientas para el modelo de simulación.	24
6.5	AJUSTE DE FUNCIÓN DE PROBABILIDAD E INCLUSIÓN AL MODELO DE SIMULACIÓN.....	24
6.6	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	25
7	DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN	28
7.1	SELECCIÓN CASO DE ESTUDIO	28
7.2	RECOPIACIÓN DE DATOS	31
7.2.1	Fuente, nivel calidad de datos y tratamiento de datos.....	31
7.3	MODELO DE SIMULACIÓN DE DURACIÓN Y COSTOS DEL PROYECTO	32
7.3.1	Ajuste de distribución de probabilidad e inclusión al modelo de simulación	37
8	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	39
8.1	CASO DE ESTUDIO “PROYECTO TIPO”	39
8.2	SIMULACIÓN DEL PROYECTO ANTES DE LA PROGRAMACIÓN	44
8.3	ANÁLISIS SIMULACIÓN DEL PROYECTO DE EJECUCIÓN	48
8.4	EVALUACIÓN POR METODO VALOR GANADO	52
9	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	54
10	ANEXOS	56
11	BIBLIOGRAFÍA	57

1 INTRODUCCIÓN

En el país ante las señales de desaceleración que ha venido mostrando la economía, el gobierno nacional ha decidido implementar un agresivo plan de obras que puede llegar a los 70 billones de pesos (Andrade, 2015). El gobierno quiere construir modernas autopistas, vías con el objetivo de ponerle fin a los 20 años de atraso que se tiene en infraestructura vial y tener un país mucho más competitivo e integrado. El gobierno, en los últimos años ha cerrado decenas de contratos y concesiones donde solo para autopistas 4G, a la fecha se han entregado 23 billones de pesos y faltarían 47 billones que vienen para nuevos proyectos en todos los frentes (Andrade, 2015). Todos estos proyectos viales buscan impulsar la economía del país disminuyendo el tiempo de transporte sobretodo el de carga pesada. Es claro que se están realizando esfuerzos importantes y actualmente se están haciendo obras de gran importancia para el país, pero muchas veces nos preguntamos, porqué en nuestro país las obras son demoradas y muchas veces vence su plazo de entrega, a pesar que contamos con todas capacidades financieras para llevar a cabo la realización de todo estos proyectos, sin tener ningún tipo de inconveniente.

Al programar actividades de obras de infraestructura vial es muy posible que esta actividad este prevista para una duración que tuvo como resultado un costo directo mínimo, pero en la mayoría de los casos este tiempo equivalente al costo mínimo no corresponde a la realidad del proyecto, por lo tanto es muy posible que el tiempo de ejecución de la obra caduque y traiga con esto diferentes costos adicionales que al finalizar el proyecto el margen de utilidad podría disminuir sustancialmente e incluso generar pérdidas. En Colombia los problemas de planeación y las fallas en la programación de obras no son temas actuales, según el especial de la revista semana y la revista dinero “La revolución de la infraestructura” desde 2006 se adelanta una de las obras más importantes del país, es la doble calzada Buga-Buenaventura, con la que se espera reducir el tiempo de viaje y aumentar la competitividad del país. Una obra de 1,2 billones de pesos, que tendría que haber comenzado a funcionar desde el 2013, pero no solo se incumplieron los plazos de entrega del proyecto sino que su costo casi se duplicó al pasar de 1.2 a 2 billones de pesos, este proyecto acumuló tantos problemas de planeación y programación que en el 2012 el propio presidente Santos no dudo de calificarlo de “diabólico” (Barragan, 2015). Hoy no se entiende como una de las carreteras más importante del país puede concentrar tantos problemas que a la fecha tiene penosos records, como el de la concesión más larga de Colombia, ya que la construcción de uno de sus tramos podría durar 55 años (Barragan, 2015).

Se podría argumentar que lo anterior solamente corresponde a casos aislados, puntuales y que solo suceden en Colombia. Pero no, según el informe de la revista española “La vanguardia” donde analiza 24 proyectos donde se invirtieron unos 3.000 millones de euros en proyectos de construcción de carreteras, revela que estos proyectos "aportaron capacidad y calidad a las redes viales y permitieron reducir la duración del trayecto y mejorar la seguridad vial", pero también señala que los retrasos en la ejecución de las obras encarecieron los proyectos de construcción de carreteras en un 23%, donde en países como España o Grecia resulta especialmente grave ya que se cuenta con un sistema de actualización de precios a la inflación. (Vanguardia, 2013)

En infraestructura vial, el tiempo de entrega cobra una importancia adicional, debido que se trata de un bien público, esencial y que está determinado para una comunidad, este a su vez requiere una construcción y un mantenimiento que implica ejecutar proyectos que consumen una gran inversión pública y que son altamente vulnerables a tener retrasos en sus actividades constructivas. En Colombia, el campo de la construcción presenta dificultades tecnológicas. En ocasiones se trabaja de una manera empírica, no se realiza una adecuada planificación o una correcta programación de las actividades constructivas que se van a realizar durante el proyecto, y en muchos casos, los plazos pactados para la ejecución del proyecto no corresponden a la realidad y a la verdadera complejidad de un proyecto vial, por lo que las empresas constructoras nacionales muchas veces no cumplen con las entregas pactadas, generando sobrecostos al final del proyecto.

En los proyectos constructivos, existen diferentes situaciones que producen retrasos en la terminación de actividades constructivas como:

- Estimación incorrecta de la duración de las actividades constructivas.
- Condiciones imprevisibles en el clima o riesgos en el sitio.
- Retrasos imprevisibles en la entrega de materiales.
- Condiciones del terreno inesperadas.

En programación de proyectos, uno de los factores que genera gran incertidumbre es asignar las duraciones a las actividades constructivas. En general, estas duraciones o tiempos, son una estimación, no se cuenta con una certeza en su determinación sino con un grado empírico de aproximación. Haciendo que se presenten grandes diferencias respecto a la realidad del proyecto. Esta investigación se centrará en la estimación de la duración de actividades constructivas donde la incertidumbre asociada a la duración de las actividades, proporciona la base para analizar los procesos constructivos en tiempos de ejecución, por eso el principal objetivo del proyecto es controlar de forma óptima la relación tiempo-costos de los métodos constructivos de un proyecto vial para obtener un mayor beneficio económico, por lo que sería necesario identificar actividades constructivas que causen un gran impacto en tiempo-costos, además se busca para su potencial implementación procedimientos óptimos de desarrollo en campo, con el fin disminuir esta relación y obtener un mayor margen de ganancias. Igualmente se identificará actividades de construcción adecuadas para la aceleración y poder alcanzar los mejores ahorros posibles en tiempo-costos, para esto es necesario programar terminar el proyecto y cada una de sus actividades constructivas con el menor tiempo posible, con un costo óptimo para cumplir con todas las exigencias reales de un proyecto vial.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

- Proponer un procedimiento de análisis de tiempo-costo en la programación de proyectos de construcción de carreteras.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar actividades constructivas de infraestructura vial que demanden una mayor cantidad de recursos (Datos tiempo-costo) y determinar las distribuciones de probabilidad que mejor se ajuste.
- Realizar simulación de la programación de obras con un software especializado y evaluar los datos obtenidos en un proyecto “tipo” ya realizado (alcance, tiempo, costo y calidad).
- Realizar un análisis de la información obtenida de la simulación y evaluación del proyecto “tipo”, haciendo las recomendaciones y conclusiones pertinentes derivadas del mismo.

3 JUSTIFICACIÓN

El estado actual de la infraestructura vial de nuestro país ha sido una constante limitante para un mayor crecimiento económico de toda la economía colombiana, por lo que es necesario ponerse al día en esta materia que es el factor clave para el desarrollo de nuestro país (Garcia, 2012). En Colombia los rezagos en infraestructura vial son un problema conocido, Colombia está dentro de las más rezagadas de la región latinoamericana y superarlo es una condición imprescindible para alcanzar niveles de competitividad y de desarrollo integral nacional (Mincomercio, 2013). Sin embargo la respuesta colombiana es muy tímida, al dedicar 0.9 por ciento del PIB a la construcción y mantenimiento de carreteras, monto que se encuentra muy por debajo del promedio de la región la cual sitúa en el 2.0 por ciento del PIB, esto podría significar, que Colombia está dedicando menos inversión de la que considera adecuada todo el continente, lo que podría suponer que cada día nos encontraríamos más rezagados en infraestructura vial lo que nos haría menos eficientes y pocos competitivos (Tiempo, 2012). A partir de esto, el gobierno nacional ha decidido implementar un ambicioso programa de infraestructura vial, que plantea la construcción y operación en concesión de más de 8,000 km de carreteras, incluyendo 1,370 km de doble calzadas, y 159 túneles, en más de 40 nuevas concesiones. Su objetivo principal es mejorar la competitividad del país, disminuyendo el costo y tiempos de transporte de personas y, en especial, de carga (Yepez, 2013). Este sin duda alguna es uno de los proyectos más ambiciosos de la historia de la infraestructura en Colombia, con una inversión estimada de \$70 billones de pesos. Actualmente el gobierno ha adjudicado los 19 proyectos viales de iniciativa pública de la primera, segunda ola de

las nuevas concesiones de cuarta generación, y se adjudicaron los correspondientes a la tercera ola de las vías 4G. (Andrade, 2015)

Siendo consecuentes con lograr estos objetivos y sin importar la poca o mucha inversión que se destine, deben existir elementos que permitan aumentar las garantías en el cumplimiento de las metas que buscan el desarrollo del país, es decir, deben hallarse las herramientas que verdaderamente aterricen la posibilidad, de que las inversiones en infraestructura vial, se realice en el lapso de tiempo esperado y con la menor cantidad posible de impactos negativos sobre parámetros como el alcance, los costos y la calidad. El gobierno nacional está realizando esfuerzos enormes en materia de inversión para volver a Colombia mucho más competitiva y eficiente, aunque estos esfuerzos para salir de este rezago de infraestructura vial no siempre cumple con las expectativas planeadas, muchos de los proyectos de infraestructura vial que se estuvieron ejecutando durante los últimos 3 años han presentado retrasos, como es el caso de la ruta de sol santa marta, que es un proyecto que pretende conectar el departamento de Cundinamarca con la costa colombiana, ha presentado retrasos en varios tramos (Arrieta, 2015). Para el mes de abril del 2014 debió haber sido entregada la doble calzada Ciénaga - Santa Marta, proyecto denominado Plan Vial del Norte, algo que no se pudo cumplir. Ante este escenario varios sectores pidieron una prórroga de un año para poder cumplir con el proyecto en su alcance básico, donde los puntos que presentan mayor retraso, son el de Guaira, La Lucha y Mama toco. (Arrieta, 2015)

Los grandes proyectos de infraestructura desarrollados actualmente, incorporan como base responder a todas las necesidades presentadas durante la ejecución. Sin embargo la utilidad y los innumerables beneficios que los grandes proyectos de infraestructura presentan son considerados como juegos de azar, caracterizados por la gran cantidad de compromisos adquirido por las partes, (Rodríguez Fernández, 2007). El riesgo es definido como la posibilidad de que el proyecto, sus eventos, el impacto y la dinámica de sus resultados se presenten de manera diferente a la anticipada, (Rodríguez Fernández, 2007).

En la industria de la construcción tiene como pensamiento común, que los proyectos de construcción de infraestructura, sin importar su tamaño, son riesgosos por naturaleza. La gran cantidad de participantes, los numerosos procesos involucrados, los problemas ambientales y de administración, son razones que dan lugar al riesgo, (Rodríguez Fernández, 2007). La industria de la construcción está sujeta a más riesgo e incertidumbre que muchas otras industrias. El proceso de tomar un proyecto desde el inicio (evaluación de inversión), hasta llevarlo a término y ponerlo en marcha resulta complejo. Generalmente involucra procesos de diseño y producción que consumen tiempo, requieren de una multitud de personas con diferentes habilidades e interés y la coordinación de una amplia gama de actividades que siendo muy diferentes, esta interrelacionadas, (Flanagan & Morgan, 2010).

La determinación de riesgos y su participación en las actividades constructivas más incidentes del proyecto, juega un papel preponderante en la estructuración financiera de un proyecto y en la

determinación de su tiempo de ejecución. A mayor riesgo asumido por el contratista mayor será su probabilidad de incumplimiento, y mayor será el precio que este requerirá para su construcción, por eso es imperioso e impostergable tener especial cuidado en la programación de actividades constructivas. En la presente investigación se busca identificar aquellas actividades críticas de infraestructura vial que demanden una gran cantidad de recurso, con el fin de buscar un modelo de análisis de programación de obras, que permita ejecutarlas de manera óptima buscando una relación tiempo-costos conveniente para el proyecto, por eso se tiene en cuenta que el costo de las actividades programadas pueden enfrentar cambios significativos debido a las incertidumbres existentes, relacionadas al tiempo de ejecución del proyecto, por lo tanto el costo total del proyecto puede inferir mucho al presupuesto inicial.

4 Antecedentes

El proyecto investigativo realizado por Solano Quiroz. (2011) .Optimización del uso de una rozadora para la excavación del túnel del Proyecto de Ampliación de la Planta Cachi (costa rica). Tenía como objetivo crear una hoja de cálculo de rendimientos de avance que sea confiable; donde se analizaron escenarios que permitieran plantear ideas de cómo optimizar el uso de la rozadora en el trabajo de ampliación de la planta; tomando en cuenta las características geométricas y geotécnicas del túnel y al mismo tiempo que se involucren las actividades necesarias para cumplir un ciclo de excavación como la extracción de material y la puesta de soporte temporal. **Se realizaron cálculos de rendimiento de ciclos de excavación con tiempos de actividades ya conocidos y utilizados, donde a partir de estos resultados se analizó cuáles son los tiempos que se pueden reducir y qué actividades se pueden realizar en forma paralela debido a las facilidades que presenta la rozadora. Luego se realizaron modulaciones en diferentes escenarios de excavación con el fin de determinar la mejor opción de excavación,** tomando en cuenta los soportes a colocar y característica de roca existente a partir de esto. Se demuestra que el uso de la rozadora reduce significativamente los tiempos de ejecución del túnel a excavar, logrando comprimir tiempos muertos y colocando tareas de manera paralela, lo que con el método convencional no se podría, a partir de las modulaciones determinan el mejor método constructivo para la extracción de material excavado de ejecución en campo y de los posibles beneficios económicos que tendríamos al programar un proyecto de una manera óptima.

Autores y artículos consultados, que han trabajado en lo anteriormente descrito y que han servido de aporte, son: (Della, 2009).

En Colombia los antecedentes de proyectos investigativos relacionados al análisis de programación de proyectos constructivos son pocos. Sin embargo los mencionados a continuación han dejado una base sólida para la implementación en diferentes tipos de obras civiles.

La investigación realizada por Núñez Vergara, C. A., & Echeverry Campos, D. (2006). Creación de un sistema de referencia en Bogotá, aplicando la Construcción sin pérdidas. **En esta investigación busca diseñar modelos que permitan imitar los procesos constructivos, con el**

fin de optimizar los recursos involucrados en los mismos, aumentando la productividad mediante la disminución en tiempos y costos. Con el fin de encontrar las causas y proponer soluciones para disminuir los tiempos no productivos en proyectos de construcción en Colombia y por ende disminuir el tiempo total del proyecto, **decide luego de conocer las causas de pérdidas en los proyectos, proponer estrategias de mejoramiento para reducir o eliminar tiempos no productivos**, tales como brindar a los trabajadores los elementos de seguridad necesarios para evitar accidentes y riesgos de trabajo, localizar el acopio de materiales teniendo en cuenta el lugar final de llegada y evitar grandes recorridos, organizar los tiempos de trabajo y descanso del personal, y disponer de personal exclusivo para realizar actividades contributivas.

Autores y artículos consultados, que han trabajado en lo anteriormente descrito y que han servido de aporte, son: (Arango, 2006), (Paez, 2007), (Gomez Cabrera, Echeverry, Giraldo Palma, Otálora Sanchez, & Cano Morales, 2012).

En el 2009 Gómez, A. (2009). Simulación de Procesos Constructivos. Universidad de los Andes, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental (Doctoral dissertation, Tesis de Maestría). Realiza mediciones en campo utilizando un cronómetro y fotografías de procesos constructivos, así como la opinión de expertos para determinar el flujo de trabajo, los tiempos estimados de ejecución para cada actividad y los recursos necesarios en cada caso. **Con base a lo anterior desarrolla un modelo de simulación de procesos constructivos y realiza escenarios teóricos buscando disminuir los tiempos de ejecución del proyecto.** Obtiene disminuciones considerables cuando realiza la combinación de optimización de recursos, disponibilidad permanente de materiales e inicio de algunas actividades puntuales de manera temprana.

Autores y artículos consultados, que han trabajado en lo anteriormente descrito y que han servido de aporte, son: (Céspedes, 2010) , (Gómez Cabrera & Orozco Ovalle, 2010).

La escuela de Ingeniería Civil y Geomática de la Universidad del Valle, por medio del grupo de investigación “GRUA” ha realizados grandes aportes al análisis de programación de proyectos constructivos, de los cuales se destacan los siguientes:

La investigación realizada por Erick Ramírez (2013), como tesis de pregrado. **Efectos de la incertidumbre, asociada a la estimación de duraciones de actividades, en la programación de proyectos de construcción de infraestructura vial. Universidad del valle, Departamento de Ingeniería Civil y Geomatica.** El objetivo principal era determinar los impactos que produce la incertidumbre asociada a la variación de las duraciones de las actividades, debido a las estimaciones en las mismas. Se planteó, a partir de un proyecto *tipo* de construcción de infraestructura vial, haciendo uso del método de la ruta crítica (CPM), las técnicas del valor ganado (EVMS) y de Simulaciones Monte Carlo (MCS) incluir la variabilidad (incertidumbres) a un modelo que describe la programación del proyecto *tipo*. En su tesis Erick Ramírez recomienda que **Conocer los efectos de la incertidumbre asociada a la duración de las actividades: Podría proporcionar la base para optimizar los procesos constructivos** en tiempos de ejecución, enfocándose en las actividades cuyas incertidumbres produzcan los impactos más nocivos y

aprovechando aquellas con efectos positivos. Además reconoce que **debido a la identificación de las operaciones con alta incidencia sobre tiempo y costo durante la ejecución: Es posible materializar la implementación de mejoras en los requisitos licitatorios para los proponentes, en pro de disminuir sobre costos presupuestales y aumentar garantías de tiempos de ejecución.**

De igual manera Hernán Darío Gómez en su investigación de maestría, **Efectos de la incertidumbre en la programación de proyectos de construcción de carreteras (2015)**. Donde revisaron 40 proyectos de construcción de infraestructura vial, recolectaron documentos como las bitácoras de obra, actas de liquidación y memorias de cantidades de las actas de pagos parciales, y la información de programación y control de obra (Gómez & Orobio, 2015). El análisis de la información se centró en los costos de las actividades y su duración en el desarrollo de las obras. Se identificaron los eventos que afectaron de manera directa el costo o la duración de las actividades que componen el proyecto en estudio. Con base en los datos obtenidos se establecen algunas causas que impactan los rendimientos de algunas actividades. Las causas se clasificaron como eventos exógenos aquellos sobre los que el constructor no tiene control y eventos endógenos aquellos que pueden ser controlados por el constructor.

Actividad	Causa de retrasos				
	Lluvia	Daño mecánico.	Especificaciones Técnicas.	Falta de personal.	Falta de suministro.
Cajeo base granular	X	X	X		
Carpeta asfáltica	X	X	X		
Conformación de subrasante	X	X	X	X	X
Cuneta de concreto	X		X		
Encole y descole (Concreto)	X			X	
Imprimación de líneas de demarcación	X	X	X		
Sub-base tubería de concreto	X				

Tabla 1 Matriz de causas que afectan la duración de las actividades. Fuente: Hernán Darío Gómez-Efectos de la incertidumbre en la programación de proyectos de construcción de carreteras

Como conclusión a su investigación obtiene que la mayoría de las causas que afectan la duración de actividades son endógenas, los problemas de estimación de costos y duración de las actividades constructivas en el proyecto pueden ser mitigados por el constructor con una buena gestión del proyecto.

Autores y artículos consultados, que han trabajado en lo anteriormente descrito y que han servido de aporte, son: (Flanagan & Morgan, 2010), (Barraza, Back, & W.E. and Mata, 2004), (Olsen & Osmundsen, 2005).

El estudio de cada una de las investigaciones y de los artículos relacionados mostrados en este capítulo, fueron la base para el trazado de los objetivos y metodología desarrollada. Todos y cada uno de ellos, sin importar el tamaño del aporte realizado, fueron fundamental para el desarrollo de la presente investigación.

5 MARCO CONCEPTUAL

5.1 PROYECTOS DE INFRAESTRUCTURA VIAL

La infraestructura vial es el medio a través del cual se le otorga conectividad terrestre al país para el transporte de personas y de carga, permitiendo realizar actividades productivas, de servicios, de distracción y turísticas (Vallverdu, 2012).

Estos proyectos sean rehabilitación o construcción constituyen una pieza clave e indispensable para el desenvolvimiento de la economía y desarrollo productivo del país. La interconectividad terrestre necesaria para el sistema de centros poblados, zonas rurales y territorios en su conjunto e integridad, potencian el desarrollo territorial y nacional (Vallverdu, 2012).

5.2 SELECCIÓN CASO DE ESTUDIO

El estudio de casos permite analizar el objeto de estudio en su contexto real, utilizando múltiples fuentes de evidencia, cuantitativas o cualitativas simultáneamente. En el conocimiento de determinar fenómenos complejos, es una metodología que puede aportar contribuciones valiosas si es empleada con rigor y seriedad, aplicando procedimientos que incrementan su confiabilidad y validez. (Larrinaga & Rodriguez, 2010)

La selección de un caso de estudio (Yin, 1989), tiene como características, el tipo de preguntas que pueden ser respondidas mediante su uso, permiten que sea una estrategia adecuada para abordar, cuestiones como las siguientes:

- Explicar las relaciones causales que son demasiado complejas para las estrategias de investigación mediante encuesta o experimento.
- Describir el contexto real en el cual ha ocurrido un evento o una intervención.
- Evaluar los resultados de una intervención.

- Explorar situaciones en las cuales la intervención evaluada no tiene un resultado claro y singular

5.3 ANÁLISIS DE RIESGO E INCERTIDUMBRE

Toda acción humana involucra riesgo. En nuestra vida cotidiana, uno se enfrenta a una diversidad de situaciones que implican muchos factores desconocidos e inesperados, con frecuencia no deseados y en muchas ocasiones no predecibles. Estos factores se pueden agrupar convenientemente en la categoría de riesgo. (Hertz & Thomas, 1983)

Se define como riesgo toda probabilidad de ocurrencia de aquella situación que puede entorpecer el normal desarrollo de las funciones y actividades de una empresa, que impidan el logro de sus objetivos, en cumplimiento de su misión y su visión, se refiere a la variabilidad de los beneficios esperados por los inversionistas. (Bazzani & Carmen Lucia, 2007)

El análisis de riesgo ayuda a estimar los impactos negativos sobre el proyecto y a tomar decisiones viables las cuales no afecten el alcance del proyecto (Bazzani & Carmen Lucia, 2007). La medición del riesgo se basa en análisis cuantitativos dependiendo de la cantidad de datos existente y análisis cualitativos que dependen del juicio personal o experiencia del analista. (Bazzani & Carmen Lucia, 2007)

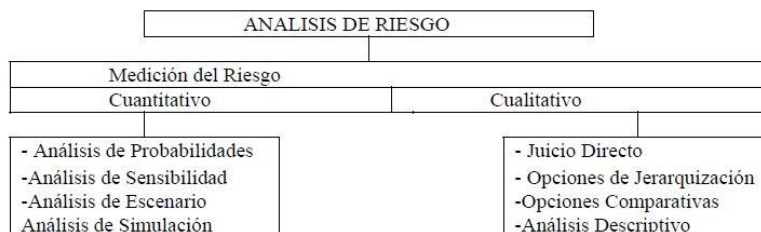


Figura 1 Análisis de riesgo. (Flanagan & Morgan, 2010)

5.3.1 Análisis cuantitativo de riesgos

Tiene como objetivo analizar numéricamente la probabilidad de cada riesgo y su consecuencia en los objetivos del proyecto, así como el grado de riesgo general del proyecto. Este proceso cuantitativo utiliza técnicas para estimar cual es la probabilidad de ocurrencia de un evento.

- **Análisis de probabilidades:** El análisis de probabilidad corresponde a la evaluación numérica de la posibilidad de cumplir objetivos trazados a lo largo del proyecto, (Project Management Institute, Inc, 2000)
- **Análisis de sensibilidad:** El análisis de sensibilidad ayuda a determinar los riesgos e impactos que se tienen en el proyecto, analizando factores críticos del modelo, examinando el grado de incertidumbre de cada elemento y como este puede afectar el desarrollo del proyecto, (Palisade, 2014)

- **Análisis de escenarios:** El análisis de escenarios se estructura como un diagrama de árbol que describe una decisión en cuestión y las implicaciones de la elección de una u otras alternativas disponibles, incorporando probabilidades de riesgos, los costos y los beneficios de la decisión tomada, (Project Management Institute, Inc, 2000)
- **Análisis de simulación:** Muestra una forma específica y detallada del impacto del riesgo sobre los objetivos de los proyectos, permitiendo evaluar a nivel total del proyecto sus consecuencias, (Project Management Institute, Inc, 2000)

5.3.2 Análisis cualitativo de riesgos

El análisis cualitativo de riesgos es una manera de determinar la importancia de abordar los riesgos específicos y orientar respuestas ante estos escenarios, evaluando el impacto y la probabilidad de los riesgos identificados, priorizando según su potencial impacto sobre el proyecto. En este caso, los riesgos identificados para cada una de las actividades del proyecto, se define en riesgos cualitativos por ejemplo: riesgo alto, riesgo medio, riesgo bajo, (Project Management Institute, Inc, 2000).

- **Juicio directo:** Puede provenir de cualquier miembro del equipo del proyecto, dando información sobre situaciones o riesgos presentados en proyectos anteriores con características similares, (Project Management Institute, Inc, 2000).
- **Orden de jerarquización:** Lista los riesgos identificados priorizando su trascendencia en el proyecto para su análisis y la gestión adicional, (Project Management Institute, Inc, 2000).
- **Opciones comparativas:** Se evalúa el riesgo de forma cualitativa de la toma de decisiones ante uno o varios escenarios planteados, comparando su incidencia en el desarrollo total del proyecto, (Project Management Institute, Inc, 2000).
- **Análisis descriptivo:** Análisis descriptivo ayuda a conocer la identificación y asignación individual de asumir la responsabilidad del riesgo asumido, (Project Management Institute, Inc, 2000).

5.4 PRÁCTICAS DE RESPUESTA AL RIESGO

5.4.1 Simulación Montecarlo

La simulación de Monte Carlo es una técnica que combina conceptos estadísticos (muestreo aleatorio) con la capacidad que tienen los ordenadores para generar números pseudo-aleatorios y automatizar cálculos, (Faulín, 2014). Los orígenes de esta técnica están ligados al trabajo desarrollado por Stan Ulán y John Von Neumann a finales de los 40 en el laboratorio de Los Álamos, cuando investigaban el movimiento aleatorio de los neutrones (Faulín, 2014). En años posteriores, la simulación de Monte Carlo se ha venido aplicando a una infinidad de ámbitos como alternativa a los modelos matemáticos exactos o incluso como único medio de estimar soluciones para problemas complejos. Así, en la actualidad es posible encontrar modelos que hacen uso de

simulación Monte Carlo en las áreas informática, empresarial, económica, industrial e incluso social (Jegel, 2014).

Las medidas de desempeño de un proyecto más influyentes son la fecha de terminación y costo, ambas dependen típicamente de las duraciones de las actividades del proyecto. Tradicionalmente para estimar la duración y el costo de un proyecto se basa en las técnicas PERT/CPM (Taha, 2006). El método de la ruta crítica (CPM) y la técnica de evaluación y revisión de proyectos (PERT) se han usado desde los años 1950, para estimar la duración de un proyecto. El CPM permite encontrar la duración de un proyecto cuando se conoce con certeza las duraciones de las actividades, mientras que el PERT permite incorporar incertidumbre en estas duraciones, pero considera solo las duraciones esperadas para identificar la ruta crítica, y en consecuencia la validez de los métodos clásicos PERT/CPM depende de varios supuestos como los que las duraciones de las actividades son estadísticamente independientes, las relaciones de precedencia de una actividad deben ser “inicio-fin” (es decir, la actividad debe haber concluido para que la actividad siguiente pueda iniciar) y se asume una única ruta crítica que se determina con las duraciones esperadas de las actividades. En la realidad es difícil que un proyecto cumpla con estos supuestos, debido a que la incertidumbre en la ruta crítica y, asimismo la precedencia entre actividades puede ser diferentes a la tradicional “inicio-fin”. Por esta razón actualmente se están desarrollando técnicas más robustas que los clásicos PERT/CPM, (Meredith & Mantel, 2009).

Las incertidumbres asociadas a las duraciones de las actividades se pueden incorporar al análisis de un proyecto utilizando distribuciones de probabilidad, pero debido a las relaciones de precedencia, no es posible obtener expresiones analíticas para las estimaciones de las medidas de desempeño por lo que la simulación es una herramienta apropiada para analizar un proyecto. El concepto de simulación se refiere a la imitación del comportamiento de un sistema por medio de un modelo cuyo desempeño puede evaluarse por computadora, (Law, 2006). Esta herramienta se utiliza principalmente cuando el modelo es complejo, en el sentido que no es posible obtener expresiones analíticas para las medidas de desempeño. Los métodos de simulación Montecarlo permiten generar variables aleatorias, por lo que se simula el desempeño de un proyecto, donde las duraciones de las actividades son variables.

La simulación Montecarlo, no se utiliza ampliamente en la gestión proyectos, su aplicación es principalmente en las áreas de gestión de costos y el tiempo para cuantificar el nivel de riesgo de un presupuesto o fecha de Terminación, (Kwak, 2005).

La simulación Montecarlo ayuda al director del proyecto a responder a preguntas tales como, "¿Cuál es la probabilidad de cumplir con la fecha de vencimiento proyecto? " y "¿Qué es (por ejemplo) el 90 por ciento de confianza, en la duración de un proyecto?", (Faulín, 2014).

5.4.1.1 Ventajas simulación Montecarlo

La simulación Monte Carlo proporciona una serie de ventajas sobre el análisis determinista, (Palisade, 2014):

- **Resultados probabilísticos.** Los resultados muestran no sólo lo que puede suceder, sino lo probable que es un resultado, (Palisade, 2014).
- **Análisis de sensibilidad.** Con sólo unos pocos resultados, en los análisis deterministas es más difícil ver las variables que más afectan el resultado. En la simulación Monte Carlo, resulta más fácil ver qué variables introducidas tienen mayor influencia sobre los resultados finales, (Palisade, 2014).
- **Análisis de escenario.** En los modelos deterministas resulta muy difícil modelar diferentes combinaciones de valores de diferentes valores de entrada, con el fin de ver los efectos de situaciones verdaderamente diferentes. Usando la simulación Monte Carlo, los analistas pueden ver exactamente los valores que tienen cada variable cuando se producen ciertos resultados. Esto resulta muy valioso para profundizar en los análisis, (Palisade, 2014).

5.5 METODO VALOR GANADO (EVM)

El método del valor ganado es una técnica excelente para evaluar el estado del proyecto y dirigir un proyecto, (Alba, 2014). El análisis del valor ganado también es una forma eficaz de responder preguntas como ¿Cuál es el avance del proyecto en términos de programa y costos? ¿Cuánto costará terminar el proyecto? ¿Qué, quien y dónde están las causas de un excedente en los costos o del programa?, (Larson & Gray, 2015).

El estado del proyecto es medido con base a costo, tiempo y alcance, también referenciado como “la triple restricción” el EVM está siempre indicando el comportamiento de cada una de las variables, (Alba, 2014). El sistema de valor ganado inicia con los costos en fases de tiempo que proporcionan la línea base del presupuesto, que se llama valor presupuestado planeado del trabajo programado. Dada esta línea base cronológica, se hacen comparaciones con el programa real y el planteado, (Larson & Gray, 2015).

Glosario de términos

Ev	El valor ganado de una tarea es tan solo el porcentaje de terminación por su presupuesto original dentro de otra forma. El Ev es el porcentaje del presupuesto original que se ha adquirido por el trabajo real completado.
Pv	La línea base cronológica planeada del valor del trabajo programado.

Ac	Costo real del trabajo completado. Es la suma de los costos en que se incurrió para cumplir con los trabajos.
Cv	Varianza del costo en la diferencia entre el valor adquirido y los costos reales del trabajo completado.
Sv	La varianza programado es la diferencia entre el valor adquirido y los costos reales del trabajo completado.
Cet	Costo calculado a la terminación
Etc	Costo calculado para terminar el trabajo restante.
Vac	Varianza del costo a la terminación. Este indica costo esperado real superior o inferior a la terminación.

Tabla 2 Glosario de términos, (Larson & Gray, 2015)

Para medir los logros, el método del valor ganado se centra en dos cálculos fundamentales

- Comparar el valor ganado (Ev), con el programado esperado (Pv).
- Comparar el valor ganado (Ev), con los costos reales (Ac)

5.5.1 Índice de desempeño

El índice de desempeño CPI mide la eficiencia del costo del trabajo logrado hasta la fecha de interés

Índice	Costo (CPI)	Programa (SPI)
> 1.00	Bajo costo	Adelante en el programa
= 1.00	En costo	En el programa
< 1.00	Sobrecosto	Retrasado en el programa

Tabla 3 Índice de desempeño CPI, (Larson & Gray, 2015).

El CPI es el índice más aceptado y utilizado. Se ha probado con el paso del tiempo y se ha encontrado que es el más preciso, confiable y estable, (Larson & Gray, 2015).

5.5.2 Índice de porcentaje de terminación del proyecto

Se utilizan dos índices de porcentaje de terminación de proyecto, según el que se considere que es el más representativo para el proyecto. El primer índice hace suponer que el presupuesto original de trabajo completo es la información más confiable para medir el porcentaje de terminación del proyecto. El segundo índice asume que los costos a la fecha y el costo esperado a la terminación son los más confiables para medir el porcentaje de terminación del proyecto. Estos índices comparan el avance a la fecha hasta el final del proyecto. (Larson & Gray, 2015)

- Índice de porcentaje de terminación $PCIB = \frac{EV}{BAC}$, indica el porcentaje de terminación en términos de cantidades de obra presupuestadas.
- Índice de porcentaje de terminación $PCIC = \frac{AC}{CET}$, el porcentaje de terminación en términos de dinero real gastado, para cumplir con el trabajo a la fecha.

5.6 TRATAMIENTO DE DATOS ESTADISTICOS

La recopilación de datos es la primera fase de todo estudio que comprenda datos estadísticos y quizá la más delicada, pues va a determinar la calidad de todo el trabajo, por muy bien que hagamos lo demás como ordenación, análisis e interpretación; si los datos no reflejan la correcta realidad que intentamos estudiar, será evidente que los resultados no serán los correctos, alejándonos más de la realidad (Martín Martín, 2008).

El diagrama de caja es una representación semi-gráfica de una distribución, construida para mostrar sus características principales y señalar los posibles datos atípicos, es decir, aquellas observaciones que parecen ser distintas de las demás, un diagrama de cajas se constituye de lo siguiente:

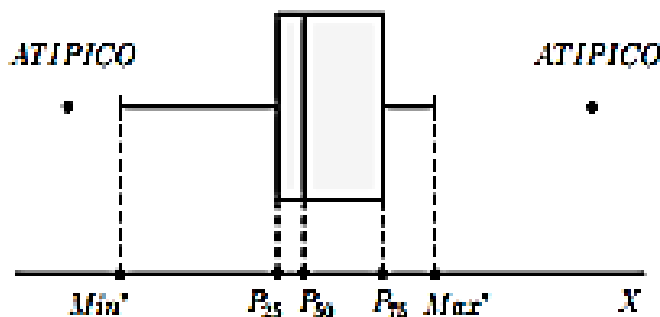


Figura 2 Diagrama de Cajas. (Martín Martín, 2008)

- **Mediana:** Valor que aleja a la mitad de los casos por encima y a la otra mitad por debajo.
- **Primer cuartil (Q1):** El 25% de los casos que se encuentran por debajo de este valor.
- **Tercer cuartil (Q3):** El 75% de los casos se encuentran por encima de este valor.
- **RIC:** Rango intercuartílico diferencia entre el tercer y el primer cuartil.
- **Limites superior o inferior (Ls o Li):** Ls contiene los casos por encima de Q3 más 1.3 veces el rango intercuartílico o Li por debajo de Q1=1.5XRIC.

Lo anterior fue de mucha importancia para el desarrollo de esta investigación, ayudándonos a decidir qué datos atípicos no debían ser parte de las distribuciones de probabilidad.

5.7 ACTUALIZACIÓN DE PRECIOS UNITARIOS

Un índice de precios es un indicativo que tiene como objetivo medir las variaciones en el tiempo, con los precios de un conjunto de bienes, (Instituto Nacional de Estadística y Censos, 2002). Existen diferentes índices de precios como el índice de precios al consumidor (IPC) que mide la variación promedio de los precios de un conjunto de bienes, el índice de precios básicos del producto (IPP) que tiene como fin medir la variación promedio de los precios a los que el productor local vende su producción, el índice del costo de la construcción (ICC) mide las variaciones que experimenta el costo de la construcción de edificaciones, en muchos otros índices.

El índice de precios tiene como objetivo reflejar la variación en el nivel de precios entre dos momentos del tiempo, se refiere a un periodo base, generalmente al año en que se determina la estructuración de ponderación, para dar cuenta de las variaciones de los precios, se le asigna el índice del año base al número 100. Esto significa que cada índice mensual expresará la relación entre los precios relevados a ese mes y los promedios vigentes en el año base (Instituto Nacional de Estadística y Censos, 2002).

Para el desarrollo de esta investigación se utilizó el índice de precios de la construcción pesada (IPCC), que es un instrumento que permite medir la evolución a través del tiempo, de los precios de una canasta de insumos representativos para la construcción de carreteras y puentes (DANE, 2013).

Para actualizar el valor unitario de las actividades constructivas estudiadas, hay que multiplicar el monto que se quiere actualizar por el número índice del mes o periodo al que se quiere llevar ese monto, el producto se divide por el número índice del periodo en que se encuentra expresado originalmente (Instituto Nacional de Estadística y Censos, 2002).

$$\text{Costo actualizado} = \frac{(IPCC_x) \times \text{Costo}_b}{IPCC_{pb}}$$

donde:

$IPCC_x$ = índice de precio de la construcción pesada del periodo al cual se quiere llevar

Costo_b = Costo unitario que se actualiza

$IPCC_{pb}$ = Índice de precio de la construcción pesada del periodo donde ocurre el costo

5.8 AJUSTE DE DISTRIBUCIONES DE PROBABILIDAD

Un elemento importante en los procesos de simulación es identificar las distribuciones de probabilidad apropiada para los datos. Esto normalmente requiere analizar información histórica y ajustarla a alguna distribución de probabilidad. En el análisis de riesgo de un proyecto, existe una gran variabilidad de distribuciones de probabilidad continuas y discretas, que al realizar un análisis de riesgos mediante simulación Monte Carlo permiten analizar el desempeño de un proyecto. Cuando se tienen un recopilado de datos históricos surgen cuestionamientos como ¿Qué función de probabilidad se ajusta a los datos recopilados?, y ¿esta función de probabilidad representa la realidad del proyecto estudiado?

El proceso estadístico de “bondad de ajuste” permite indicar cuál es la mejor función de probabilidad que se ajusta al conjunto de datos recopilados. La “bondad de ajuste” permite comparar funciones de distribución de probabilidad que se ajustan a los datos y seleccionar aquella que representa la realidad del proyecto, (Palisade Corporation, 2013).

Existen un conjunto de criterios estadísticos que son utilizados de tal manera de obtener la mejor distribución posible o “bondad de ajuste” que se ajuste al conjunto de datos históricos recopilados:

- **Chi Sq o Chi Square Test:** La prueba de Chi Cuadrado Chi Sq, es la prueba más común en la determinación de la “bondad de ajuste”, puede ser utilizada con los datos de entrada para cualquier tipo de distribución (Continua o discreta). Una debilidad de Chi Sq o Chi Square Test, es que no presenta una guía clara para la selección de los intervalos de confianza, en muchas ocasiones y aun partiendo de la misma muestra de datos, se puede llegar a diferentes conclusiones dependiendo de cómo se especifiquen el rango de confianza. (Palisade Corporation, 2013)
- **Kolmogorov-Sminnov Test (K-S):** El análisis estadístico K-S no depende del número de intervalos o rangos, lo cual lo hace mucho más confiable que Chi Sq. Este análisis estadístico puede ser usado con muestra de datos de entrada, pero no para ajuste de distribuciones discretas. Una debilidad de esta prueba es que no detecta muy bien las “discrepancias de cola”. (Palisade Corporation, 2013)
- **Anderson-Estadística Darling (AD):** El análisis estadístico de datos Anderson Darling, al igual que K-S no depende del número de intervalos y rangos, se puede utilizar para datos de muestra continua. La estadística AD, a diferencia del estadístico K-S, da un mayor énfasis en los valores de cola. (Palisade Corporation, 2013)
- **RMS Error:** La raíz del error cuadrático medio o RMS, solo aplica si los datos de entrada son una curva de densidad o una curva acumulada. (Palisade Corporation, 2013)

5.9 CUANDO NO HAY SUFICIENTES DATOS RECOPIRADOS

Cuando no existe información disponible, todo queda librado al juicio de quien construye el modelo, en cuanto a seleccionar la distribución adecuada a utilizar para realizar el modelo.

Pueden presentarse situaciones en las que no se tenga idea de que distribución utilizar. En estos casos, deberá definir a criterio, un intervalo de valores $\{a, b\}$ que podría tomar la variable en estudio. Si no existen razones para pensar que algunos valores dentro del rango son más probables que otros, se utilizará la distribución uniforme. (Fiorito, 2006)

Por el contrario, si en efecto, existe razones para pensar que cierto valor “c” comprendido entre $\{a, b\}$ tiene una probabilidad mayor que el resto, sería adecuado utilizar distribución triangular. (Fiorito, 2006)

5.9.1 Distribución uniforme

Se caracteriza por el hecho de que todos los resultados posibles entre un cierto mínimo y máximo son igualmente probables.

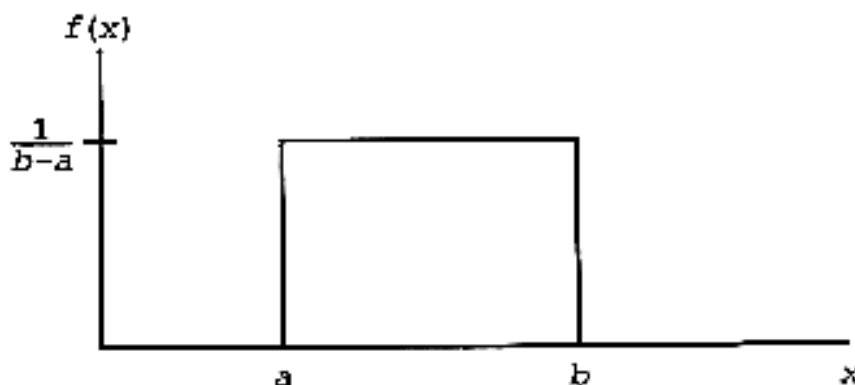


Figura 3 Distribución Uniforme, (Coss Bú, 2013)

El mínimo es el parámetro de ubicación, mientras que la diferencia entre el máximo y el mínimo es el parámetro de escala. No hay parámetro de forma. La distribución uniforme se utiliza cuando hay muy poca información disponible respecto de la variable aleatoria, los parámetros mínimo y máximo se fijan para reflejar la mejor estimación del rango de valores que puede tomar la variable aleatoria. (Coss Bú, 2013)

5.9.2 Distribución normal

Se caracteriza por su forma acampanada. Es simétrica y tiene la propiedad de que la mediana, la moda y la media aritmética coinciden. A pesar de que no es cerrada, la mayor densidad está cercana a la media. Se caracteriza por dos parámetros: la media, μ (parámetro de ubicación) y la varianza σ^2 (parámetro de escala), (Coss Bú, 2013).

Existe un caso particular de esta distribución, la distribución normal standard, con $\mu = 0$ y $\sigma = 1$. La distribución normal se observa en numerosos fenómenos y también muchas distribuciones tienden a la normal, es por ello que es una de las más utilizadas.

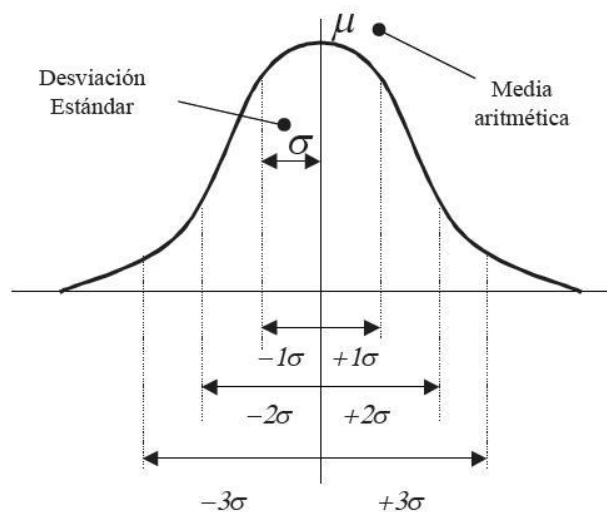


Figura 4 Distribución normal, (Coss Bú, 2013)

5.9.3 Distribución triangular

Se define por tres parámetros: el mínimo a , el máximo b , y el valor más probable c . Variando la posición del valor más probable con relación a los extremos, la distribución puede ser simétrica o no. (Coss Bú, 2013)

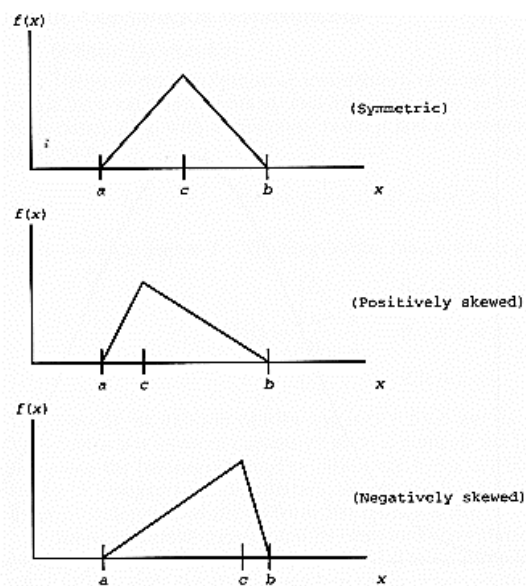


Figura 5 Distribución Triangular, (Coss Bú, 2013).

5.10 MÉTODO DE LA RUTA CRÍTICA (CPM)

El método de la ruta crítica es una técnica para la planeación y dirección de todo tipo de proyectos. Consiste en la representación del plan de un proyecto a través de un diagrama esquemático o red que muestra la secuencia y la interrelación de todas las partes componentes del proyecto, como el análisis lógico y la manipulación de la red para determinar el mejor programa general de operación. Es un método adecuado para la industria de la construcción, permite la evaluación pronta y comparación de programas opcionales de trabajo, de métodos de construcción y de diferentes equipos necesarios para llevar a cabo los trabajos. Cuando el mejor plan para la ejecución del proyecto es preparado de esta forma, el diagrama de la ruta crítica indica con claridad las operaciones de campo que controlan la ejecución secuencial de tareas. A medida que avanza la construcción, el diagrama suministra al director del proyecto la información precisa acerca de los efectos de cada variación o retraso en el plan adoptado, lo que permite la identificación de la operación que requiera un pronto remedio.

5.10.1 Antecedentes históricos

La técnica de la ruta crítica tuvo su origen entre 1956 y 1958 en dos problemas paralelos, pero diferentes, en cuanto a la planeación y el control de proyectos en estados unidos. Unos de los casos, la *U.S NAVY (Marina de EE.UU)* pretendía resolver lo concerniente al control de los contratos para el programa de cohete Polaris, (Santos, 2008). Estos contratos incluían investigación y desarrollo, así como la manufactura de partes componentes nunca antes fabricadas. Por esta razón, ni los costos, ni los tiempos podían estimarse con precisión, y la duración de los trabajos hasta su terminación tenía que basarse en probabilidades. Se pidió a los contratistas que estimasen sus necesidades operativas de tiempo sobre tres bases, la optimista, la pesimista y la más probable. Estas estimaciones, se evaluaron matemáticamente para determinar la fecha de terminación probable de cada contrato, este procedimiento se conoció como técnica de evaluación y revisión del programa, nombre que se abrevio a PERT. El otro caso, *E.I DU POINT NEMOURS COMPANY* construía plantas químicas importantes en estados unidos. Estos proyectos requerían que tanto como el tiempo y el costo se estimasen con precisión. El método de planeación y control que se desarrolló se denominó planeación y programación del proyecto o PPS, (Woodhead, 2002).

Estos métodos han evolucionado hasta llegar al método de la ruta crítica (CPM), donde su uso se encuentra cada vez mayor en la industria de la construcción, lo que ha permitido revisar todas las operaciones por el método de la ruta crítica de acuerdo con las condiciones previstas y los riesgos que se encuentran en el terreno (Woodhead, 2002)

5.10.2 Estado actual

El uso del método de la ruta crítica (CPM) se ha consolidado como una técnica muy útil en la industria de la construcción, es de gran importancia para los contratistas, los que realizan estimaciones, los ingenieros de la construcción, los administradores de proyectos y los contadores

de los mismos. El método de la ruta crítica (CPM), es también vital para aquéllos que su trabajo se relaciona con el de la construcción, como financieras, los contadores, los gerentes, los supervisores. Su importancia en el ramo legal, va en aumento, ya que brinda una base matemática segura sobre la que se puede formular reclamaciones por retrasos, variaciones en los trabajos, cambios en los salarios. Algunos documentos de contratos ya especifican que el contratista debe presentar diagramas de la ruta crítica al iniciar los trabajos y algunos contratistas ya han utilizado el método de la ruta crítica como parte de sus procedimientos de oferta desde hace algún tiempo. El empleo del método de la ruta crítica va en aumento, donde demostrara su importancia en los registros de desempeño en tiempo y de la información de costos para la industria de la construcción. Actualmente se ha logrado muy poca documentación sistemática de las velocidades relativas de operación, bien sea por parte de las autoridades de la construcción o por los contratistas, a pesar de que tales registros son necesarios para relacionar los ritmos del desempeño real con el costo de los trabajos (Santos, 2008). Estos datos tienen mayor importancia en la estimación de los costos en los proyectos de desarrollo por parte de las autoridades y en la operación de los negocios de construcción por contrato. (Woodhead, 2002)

5.10.3 Ventajas del método de la ruta crítica

- Permite durante la ejecución del proyecto la revisión de situaciones actuales a medida que se presentan, de forma que se pueden conceder tolerancias en cuanto a los efectos de incertidumbres en la planeación original, a la vez que permite llevar a cabo una revaluación de incertidumbres futuras, y las medidas iniciadas como remedio para dichas operaciones, que requieren aceleración o corrección.
- El método de la ruta crítica se ha puesto en funcionamiento, donde ha logrado una reducción considerable en tiempos y costos de los proyectos. Su uso en los estados unidos, en la industria de la construcción, ha llevado a disminuir hasta el 20% en tiempo de los proyectos, con respecto a otros proyectos análogos que no emplearon el método de la ruta crítica.
- Su uso permite la planeación más económica de todas las operaciones para cumplir con las fechas de terminación deseables. Sustituye el juicio basado en la experiencia, antes utilizado para la selección de los tiempos de operación, los tamaños de cuadrillas de obreros, los equipos, etc.
- Proporciona un medio para evaluar el efecto de todas las variaciones, como son las órdenes de cambio, los trabajos extra, o las deducciones, sobre el tiempo de terminación y el costo de los trabajos.

5.11 Soluciones óptimas. Datos tiempo-costo

Los datos tiempo-costo son la información detallada de tiempo y de costo que se obtiene de la estimación de los trabajos correspondientes a cada actividad del proyecto. Tales datos están presentados de manera que se muestre el costo directo y el tiempo requerido para cada método posible de ejecución de cada actividad. Esta información básica se requiere para determinar el

costo óptimo del proyecto y la duración optima del mismo. Esta solución debe encontrarse en algún punto entre los dos extremos de la solución del costo mínimo y la solución del tiempo mínimo. (Woodhead, 2002)

La solución del costo mínimo se denomina habitualmente la solución normal y da el tiempo requerido para completar el proyecto con el costo directo más bajo. Para reducir el tiempo, un gran número de actividades deben acelerarse (hasta el límite de falla) aunque no es necesario llegar hasta la falla en cada actividad para lograr la solución de mínimo tiempo. (Woodhead, 2002)

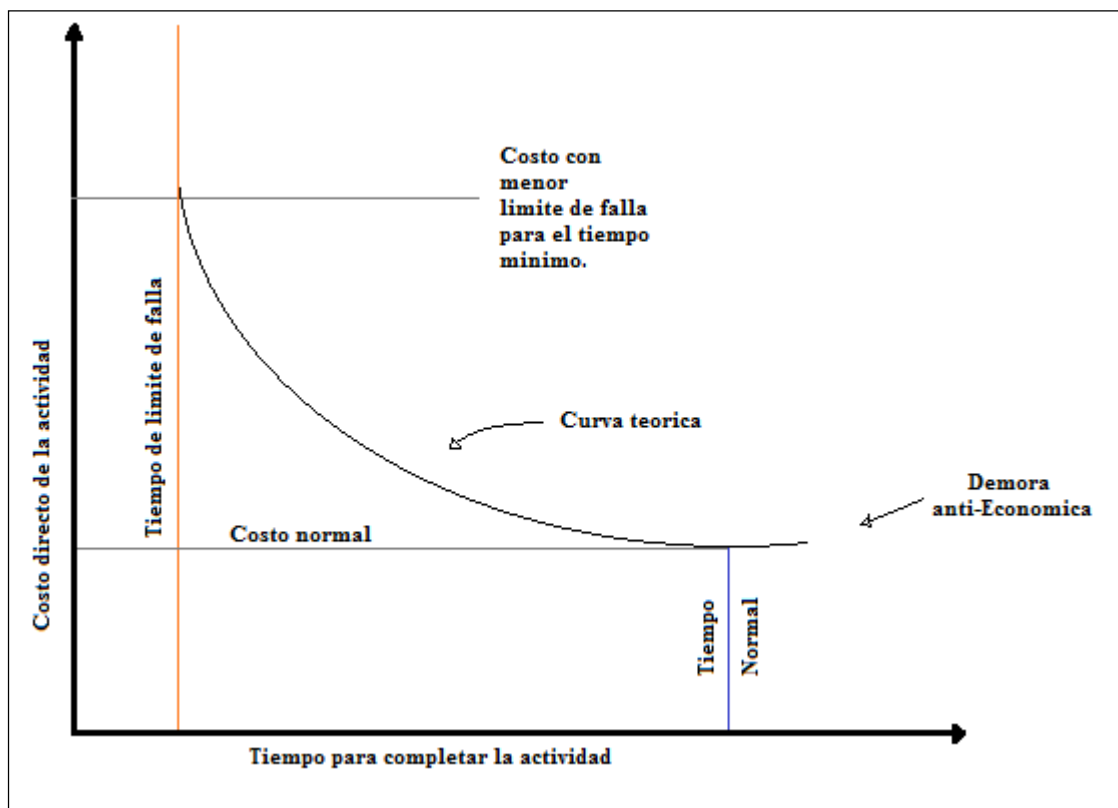


Figura 6 Curva tiempo- costo de una actividad, (Woodhead, 2002).

De manera similar, cualquier alternativa correspondiente a otras actividades puede examinarse hasta que se obtenga la solución normal, en algún punto entre la solución normal y la solución límite de falla se encuentra la solución óptima del proyecto.

El cálculo de una serie de soluciones óptimas, suministra de esta manera la curva de costo directo-tiempo para el proyecto. Al aumentar la cantidad de recursos disponibles, como mano de obra y equipo, para la solución normal de manera eficiente, se obtiene una serie de puntos; estos puntos muestran como cada aumento en la cantidad de recursos reduce el tiempo de terminación de un proyecto (Woodhead, 2002). Se puede continuar la búsqueda de soluciones óptimas consecutivas hasta que no resulte posible acelerar más el proyecto. Este procedimiento se conoce como compresión de la red.

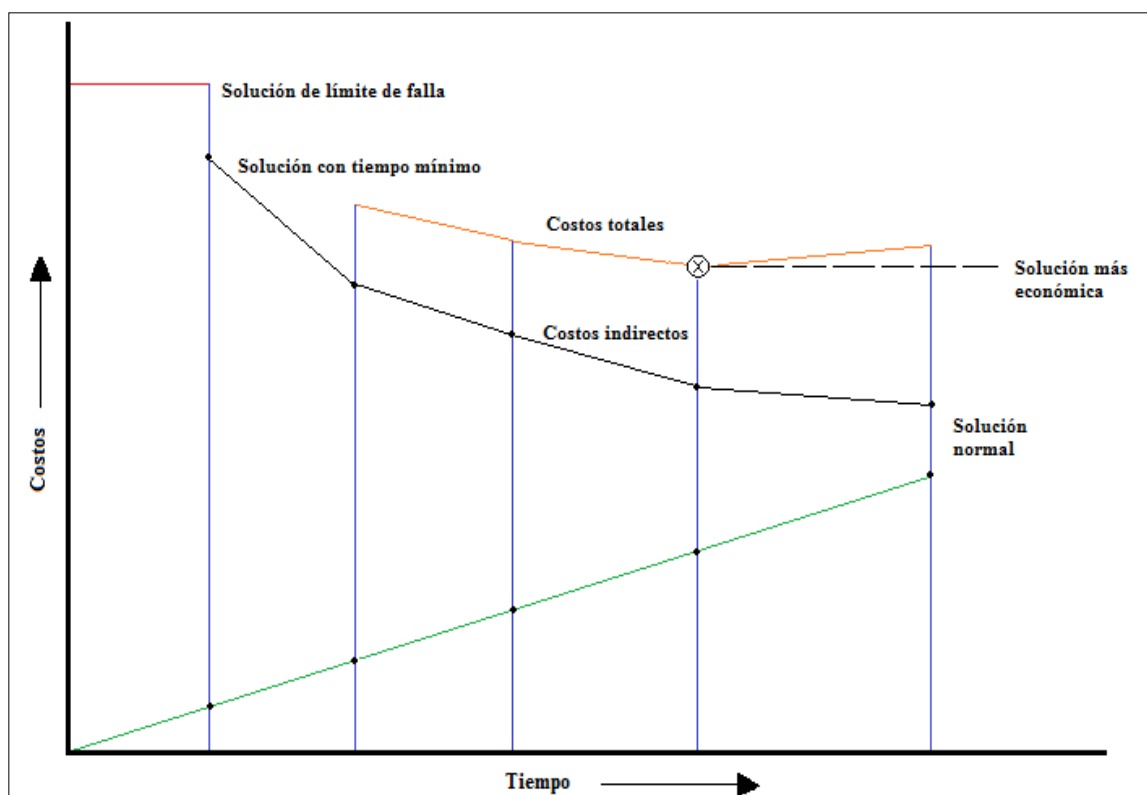


Figura 7 Curvas costo-tiempo del proyecto solución óptima, (Woodhead, 2002).

La compresión del proyecto, implica la selección de actividades críticas que pueden comprimirse de manera individual o combinada al costo mínimo por unidad de tiempo, hasta que se alcanza su límite de falla o hasta que se desarrollan otras rutas críticas; los costos directos totales y la nueva duración del proyecto se registran para cada compresión de la red. Con la aparición de nuevas rutas críticas aparecen actividades adicionales disponibles para la compresión más económica; esta a su vez, se llevan al límite de falla, hasta que resulta impracticable una nueva compresión del proyecto; con esto se alcanza finalmente la solución de falla de mínimo tiempo. De esta manera, cada etapa de compresión proporciona las coordenadas para una solución óptima. (Woodhead, 2002)

6 METODOLOGIA

6.1 SELECCIÓN CASO DE ESTUDIO

La fase inicial de la investigación es la selección del caso de estudio, que como se planteó en la sección 5.2, no es más que la escogencia de un proyecto “tipo” que permita analizar el objeto de estudio en su contexto real, por lo tanto es necesario la selección de un proyecto de infraestructura vial con las siguientes características:

- Proyecto ejecutado en la región de estudio.

- Proyecto de continua realización, para facilitar su estudio y la recopilación de datos de rendimientos y costos unitarios.
- Proyecto ya ejecutado y finalizado, que cuente con la mayor información disponible.
- Debe contener información inicialmente correspondiente a bitácora de obra, cronograma y presupuesto. Durante la ejecución, la información correspondiente a actas de comité, actas de seguimiento, actas parciales de pago, informe de interventoría e informe de contratista.

6.2 RECOPIACIÓN DATOS

Las fases iniciales de esta investigación corresponden a la recopilación de datos para el desarrollo del modelo de simulación y a la obtención y selección del caso de estudio con el cual pudiésemos cumplir los objetivos planteados inicialmente en el marco teórico.

La segunda fase de esta investigación correspondiente a la recopilación de datos de rendimientos y costos unitarios de cada una de las actividades constructivas que componen el proyecto “proyecto tipo”, es la más importantes. Esta fase determina la calidad de todo el trabajo. Si los datos recopilados no reflejan la correcta realidad de lo queremos representar, los resultados de esta investigación no serán correctos.

Cada uno de estos datos recopilados tiene que provenir de proyectos con características similares a la del proyecto caso de estudio “proyecto tipo”:

- Proyectos ejecutados únicamente en la región de estudio.
- Proyectos que su objeto de contrato fuera construcción y/o mantenimiento y/o rehabilitación de infraestructura vial o dentro de su alcance comprendiera la construcción y/o rehabilitación y/o mantenimiento vial.
- Proyectos que sus actividades constructivas tuviera la misma unidad de medida (m3, m2, und, glb, etc.) y un análisis de precios unitario por actividad similar al del “proyecto tipo”.

6.3 ACTUALIZACIÓN DE PRECIOS UNITARIOS

En la segunda fase de esta investigación, se recopila información de actas de obras, bitácoras, actas de pago y documentos de control de obras de proyectos con características similares al caso de estudio ejecutados en la región de estudio, pero posiblemente ejecutados en diferentes fechas, por este motivo el costo de los insumos, maquinaria y mano de obra no es igual y tampoco se pueden comparar ni ser tenidos en cuenta si estos datos se encuentran en fechas diferentes.

La tercera fase de la investigación, corresponde a la actualización de los costos unitarios al presente, utilizando el índice de precio de la construcción pesada (IPCC), siguiendo el marco teórico explicado en la sección 5.7 “Actualización de precios unitarios”.

Los costos unitarios que sean utilizados en la simulación no pueden incluir el porcentaje de costos indirectos; es decir se debe trabajar con costos unitarios directos.

6.4 MODELO DE SIMULACIÓN DURACIÓN Y COSTOS

La cuarta fase de la investigación corresponde a la creación del modelo de simulación de duración y costo del “proyecto tipo”, desarrollado en MS Excel 2013, con ayuda del complemento @RISK 7.5. Este modelo de simulación esta enlazado con MS Project 2013, donde evoluciona el cronograma de obra determinístico de un escenario estático, a generar resultados que refuerzan el análisis de riesgo, en vez de tener un valor estático pasamos a una distribución, con lo cual se tiene un rango o descripción más completa de tiempo de ejecución y costo total que puede tomar el proyecto, de tal manera que al modelar la realidad se puedan tomar decisiones que beneficien el proyecto.

6.4.1 Herramientas para el modelo de simulación.

Para desarrollar y aplicar el modelo de simulación que fuera acorde con los objetivos de esta investigación, es necesario la utilización de herramientas disponibles en nuestro medio. Basándose en el marco teórico y la dirección de la investigación, se identificaron cuatro herramientas para el desarrollo y puesta en contexto del modelo de simulación y optimización:

- **Microsoft Project (MS Project):** Software de administración de proyectos, especializado en administración de proyectos en el desarrollo de planes, asignación de recursos a tareas, dar seguimiento al progreso del programa, administrar presupuestos y analizar cargas de trabajo. Mediante el uso de Microsoft Project integrado al complemento @RISK 7.5 que hace parte del software Decisión Tools Suite 7.5 Industrial, se vincula el documento Project (Programa obra proyecto caso de estudio), donde se desarrolla el modelo de simulación.
- **@ Risk 7.5:** Software que realiza análisis de riesgo utilizando las distribuciones de probabilidad y la simulación para mostrar múltiples resultados posibles en un modelo de simulación, y le indica qué probabilidad hay de que se produzcan. Computa y controla matemática y objetivamente gran número de escenarios futuros posibles, y luego le indica las probabilidades y riesgos asociados con cada uno. Esto quiere decir que se puede decidir qué riesgos tomar y cuáles evitar, tomando la mejor decisión en situaciones de incertidumbre.
- **Microsoft Excel (Ms Excel):** Es la hoja de cálculo donde se implementa el modelo de simulación y el modelo de optimización, a este se le asigna las incertidumbres (Funciones de probabilidad) usando el software @Risk7.5.

6.5 AJUSTE DE FUNCIÓN DE PROBABILIDAD E INCLUSIÓN AL MODELO DE SIMULACIÓN

La quinta fase de la investigación corresponde a la inclusión de la incertidumbre de la duración y costos de las actividades constructivas, se realiza el ajuste estadístico de los datos recopilados “*tratados*” de cada actividad constructiva a las distribuciones de probabilidad del complemento @Risk 7.5 del software Decisión Tools Suite 7.5 Industrial. @Risk 7.5 cuenta con un gran número

de funciones de distribución continuas y discretas, de mayor aplicabilidad para el ajuste de datos, @Risk 7.5 por medio del proceso estadístico “bondad de ajuste” permite indicar cuál es la mejor función de probabilidad que se ajusta a los datos de interés. La “bondad de ajuste” permite comparar funciones de probabilidad que se ajusta a los datos dentro de la amplia gama de posibilidades siguiendo el siguiente proceso:

- Analiza 2 funciones de probabilidad con mayor puntaje según el criterio estadístico (ver capítulo 5.8) que más se ajuste al conjunto de datos.
- Se analiza cual es el rango de confiabilidad de la función de la probabilidad.
- El criterio de selección definitivo consta de la herramienta grafica “probabilidad-probabilidad” donde el ajuste ideal corresponde a la función de distribución que mayor se ajuste a la función teórica “ideal” donde se relaciona los “deciles” de los datos de entrada con los “deciles” de la función teórica “ideal”.

6.6 INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Por último, la última fase corresponde a la interpretación de los resultados de la simulación Monte Carlo de @Risk 7.5 se presentan en forma de distribuciones de probabilidad. Quien vaya a tomar la decisión debe interpretar estas distribuciones de probabilidad y basar su decisión en esa interpretación.

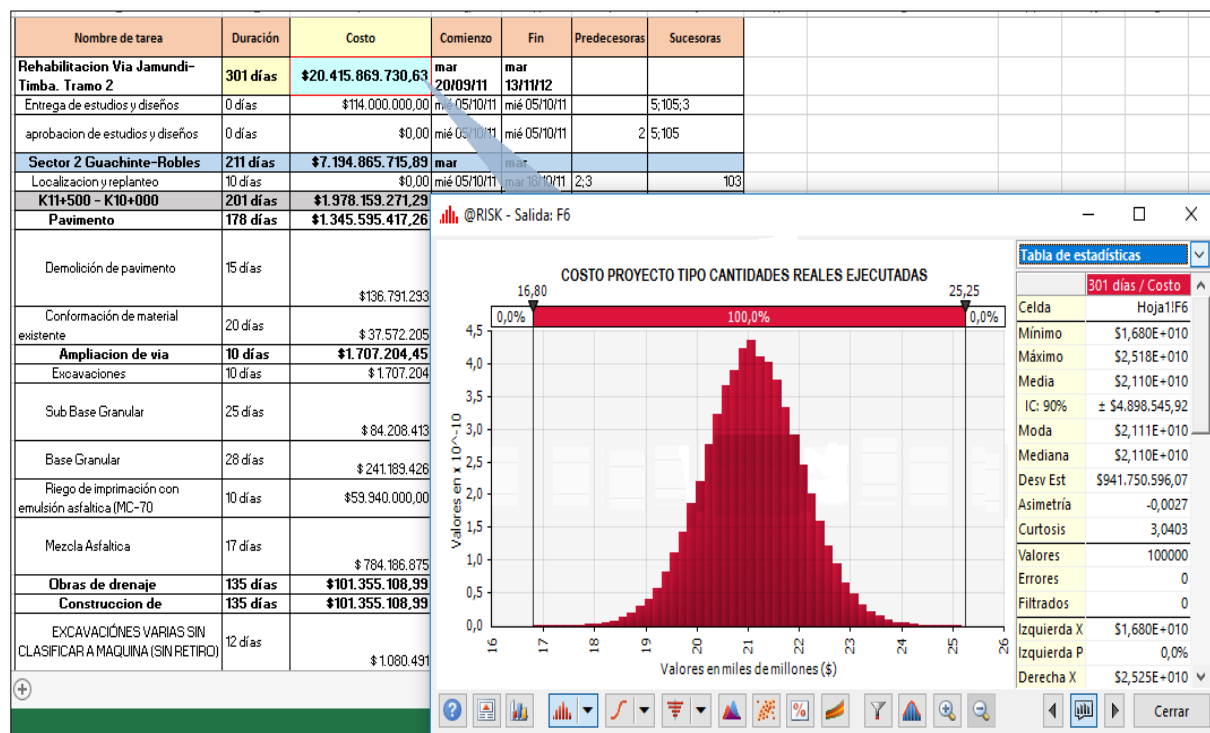


Figura 8 Variable de salida modelo de simulación costo real. @Risk 7.5.

Los diagramas y gráficos que genera el software @Risk 7.5, son los resultados que al finalizar la simulación quedan guardados en las variables de salida. La figura 8, contiene la gráfica función densidad de probabilidad para la variable de salida costo total con cantidades de obra reales

ejecutadas. Cabe entender que cada vez que se hable o se muestre diagramas similares, estos son los resultados de una simulación que están alojados en una variable de salida, las simulaciones se efectúan a lo programado inicialmente (antes de ejecución-presupuesto inicial) y a lo realmente ejecutado (cantidades de obras liquidadas).

Las funciones de probabilidad continua son la duración y costo aleatorio resultado de la simulación. En el eje X se tiene la duración del proyecto en días (Simulación duración) y costo directo del proyecto (Simulación en costos). En el eje Y está las probabilidades independiente están asociada a cada valor del eje X. Los resultados de la simulación, representados por la función densidad de probabilidad continua, es una función que asigna a cada variable aleatoria X tome un valor comprendido ente X y X+Dx.

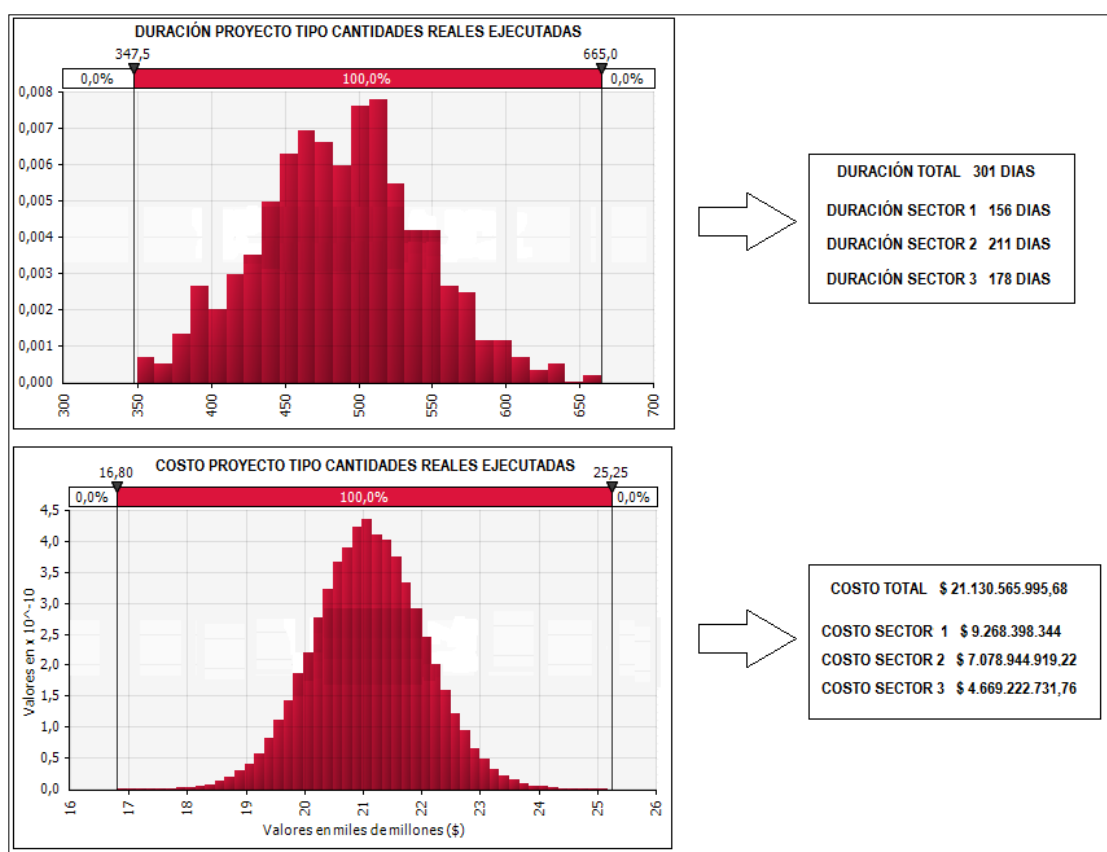


Figura 9 Variable de salida modelo de simulación. @Risk 7.5.

En el caso de la figura 9, para la simulación de costos la variable aleatoria es el posible costo directo total que puede llegar a tener el proyecto y para la simulación de duración es la posible duración total que llegar a tener el proyecto, es decir los valores ubicados en el eje X, son las variables aleatorias. En el eje Y, están las probabilidades independientes asociada a cada variable aleatoria del eje X. Al realizar una lectura aislada de una variable aleatoria, se obtendría su probabilidad independiente, por el ejemplo en la figura 9, la simulación de duración para el valor 500 días duración, su valor aproximado en el eje Y es aproximadamente 0.0074 o 0.74 %, pero

aunque este valor si es la probabilidad independiente de la variable aleatoria, en el caso de la función densidad probabilidad continua es una lectura errada, ya que para llegar a la duración 500 es imposible no haber pasado por los días 1,2,... 498, 499,500. Esto significa que si se desea calcular la verdadera probabilidad de ocurrencia, esta es la suma de todas las probabilidades independientes menores a la variable X que se encuentren comprendidos entre a y b , es decir $P(a \leq X \leq b)$. De una manera mucho más formal, las probabilidades son el área bajo la función de densidad. El área bajo la función densidad entre dos puntos a y b se interpreta como la probabilidad de que la variable aleatoria tome valores comprendidos entre a y b . En el caso de la figura 9, para la variable aleatoria duración 665 días, la probabilidad de que el proyecto este entre 0 y 665 días, es igual a 100% ya que es el área total bajo la curva de densidad probabilidad.

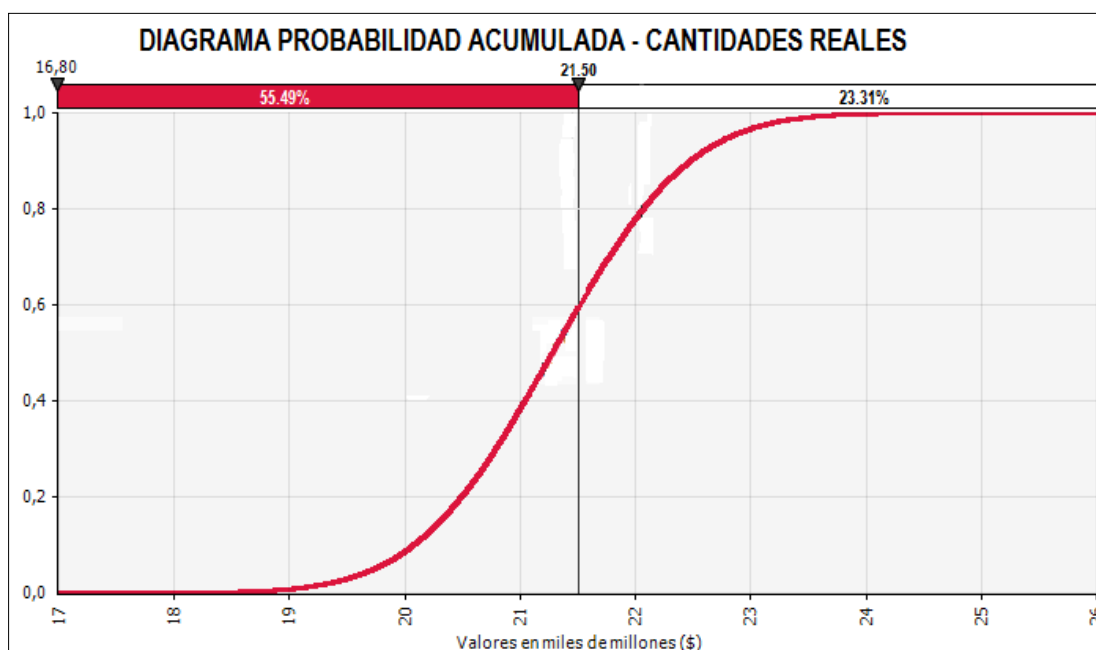


Figura 11 Diagrama probabilidad acumulada. @Risk 7.5.

Esta interpretación es la misma que se realiza al graficar la curva probabilidad acumulada figura 11, esta curva en el eje X muestra las variables aleatorias y en el eje Y muestra la probabilidad acumulada para dicha variable aleatoria, todo lo contrario a la función de probabilidad continua que muestra en el eje Y las probabilidades independientes y la probabilidad se representa como el área bajo la curva.

El análisis de las simulaciones al proyecto tipo, se realizarán con base a los resultados de estas dos gráficas, además se abordarán gráficos tornado y resultados de método valor ganado que serán explicados en profundidad en el desarrollo y análisis de la investigación.

7 DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

7.1 SELECCIÓN CASO DE ESTUDIO

Teniendo en cuenta como base teórica la sección 5.2, el proyecto de infraestructura vial que se ajustaba a las características mencionadas en la sección 6.1 y con el que se cumplirían los objetivos de esta investigación, era los proyectos de rehabilitación vial, por lo tanto ese fue el seleccionado para el desarrollo, análisis y conclusiones de la presente investigación.

El caso de estudio escogido es un proyecto realizado por la Secretaría de Infraestructura Departamental, que tuvo su cargo la gerencia y estructuración técnica, jurídica y financiera de los proyectos de Colombia Humanitaria en el departamento del Valle del Cauca y cuyo fin era responder la necesidad de recuperar la infraestructura física deteriorada durante la ola invernal que afectó a la nación y específicamente al departamento durante los años 2010 y 2011. Para tal fin se aprobó la rehabilitación de la vía Jamundí-Río Claro-Timba.

Ésta es una vía secundaria de tipo departamental ubicada en el municipio de Jamundí, que une la cabecera municipal con el sector poblado del corregimiento de Timba. En su trazado se recorren veredas y parajes de gran importancia turística, recreacional, agrícola y ganadera como son Potrerito, Río Claro, Guachinte, Tinajas y Robles, para llegar a Timba. Es parte del corredor secundario de comunicación entre los departamentos de Cauca y Valle del Cauca, de especial importancia por ser la más próxima comunicación vial terrestre hasta la represa de la Salvajina y su importante zona de influencia en el departamento del Cauca.

El proyecto fue dividido en dos tramos: El Tramo 1 entre Jamundí y el puente sobre el Río Claro con estructura de pavimento flexible (asfáltico), y Tramo 2, entre el puente sobre el Río Claro y Timba (Valle del cauca) con estructura de pavimento flexible.

El municipio de Jamundí y la Gobernación del Departamento elaboraron estudios y diseños en fase II para la rehabilitación del Tramo 1. El proyecto de la Gobernación para el Tramo 2, incluyó una primera etapa de estudios y diseños, y la posterior fase de construcción. La fase de estudios comprendió un completo análisis de las condiciones geológicas, hidráulicas y de drenaje, y estructural del pavimento existente, para adoptar una solución integral que rehabilite a condiciones óptimas la vía. El trazado existente se conservó y solo se efectuaron rectificaciones dentro de la zona actual de la vía. Considerando esta limitación de espacio, se rehabilitó el pavimento, se construyeron bermas, cunetas alcantarillas y filtros para mejorar la estructura de la vía.

El contrato de obra No. 1048 de 2011, tiene como objeto la Rehabilitación de la vía Jamundí-Río claro- Timba (Tramo 1); comprende el sector de Jamundí al puente sobre el Río Claro con una longitud de vía de 5.5 kilómetros. El contrato de obra No. 0983 de 2011, tiene como objeto la Rehabilitación de la vía Jamundí - Río Claro – Timba (Tramo 2); comprende el sector Puente sobre el Río Claro a Timba, con una longitud aproximada de 16 kilómetros.

En el caso de estudio se estudió el contrato de obra No. 0983 de 2011, rehabilitación de la vía Jamundí-Río Claro-Timba (Tramo 2), el proyecto fue dividido en tres sectores para su entrega y causar el menor inconveniente en el tráfico existente, los sectores son:

Sector 1: Río Claro a Río Guachinte Longitud: 6.5 Km., Tramo plano, de condiciones difíciles de drenaje que requerirá de especial atención en cuanto al diseño de las pendientes requeridas para el drenaje, diseño de la estructura del pavimento y sus obras de arte, buscando conciliar una solución que se adecue técnicamente a la disposición presupuestal.

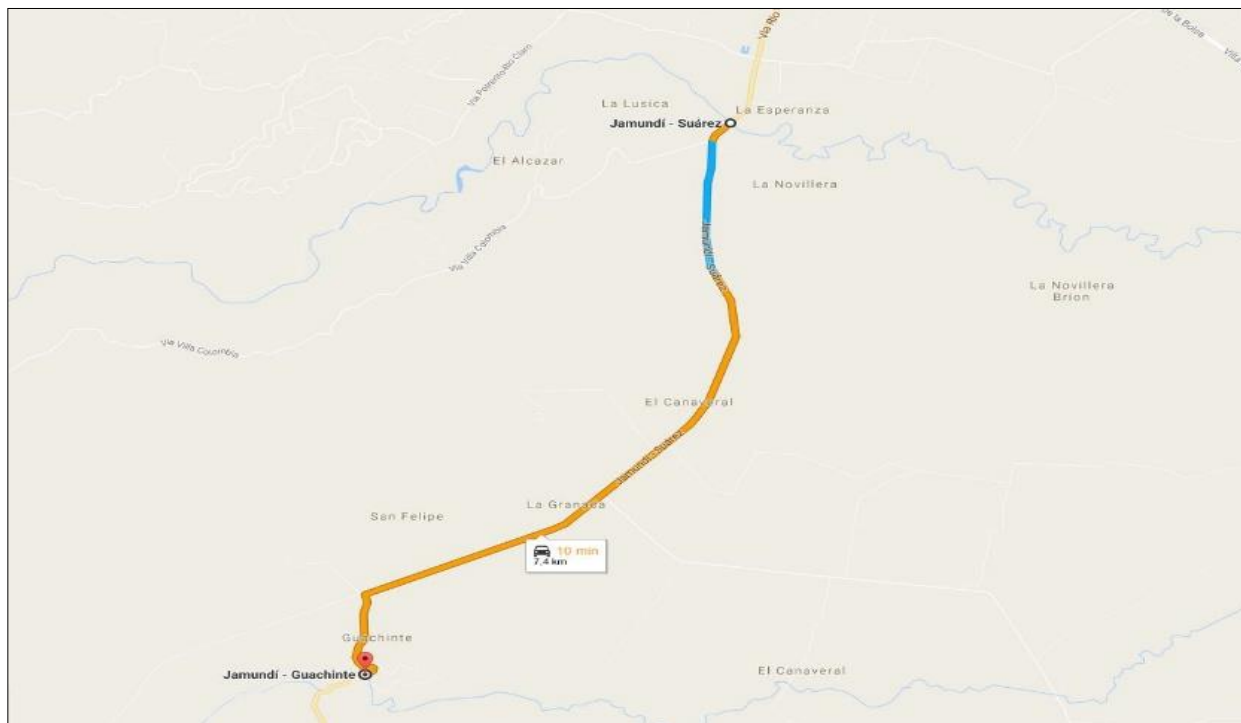


Figura 12 Sector 1. Río claro- Río Guachinte. Tomado de Google Maps.

Sector 2: Río Guachinte a Robles Longitud: 6.2 Km, Tramo ondulado, de mejores condiciones de drenaje, que se estima un menor costo por kilómetro de rehabilitación, aspirando obtener soluciones relativamente sencillas.

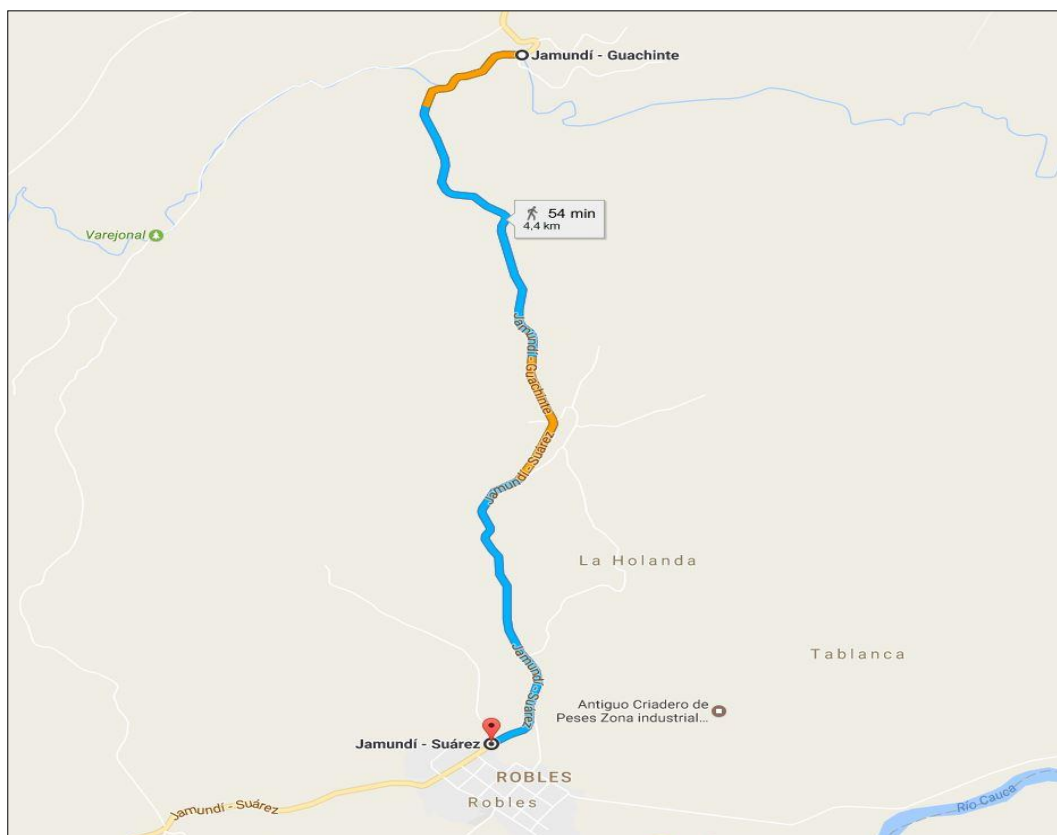


Figura 13 Sector 2. Rio Guachinte-Robles. Tomado de Google Maps.

Sector 3: Robles a Timba Longitud: 3.3 Km, Tramo ondulado y plano, de buenas condiciones de drenaje, que se estima tendrá un costo por kilómetro de rehabilitación, similar al sector 2.

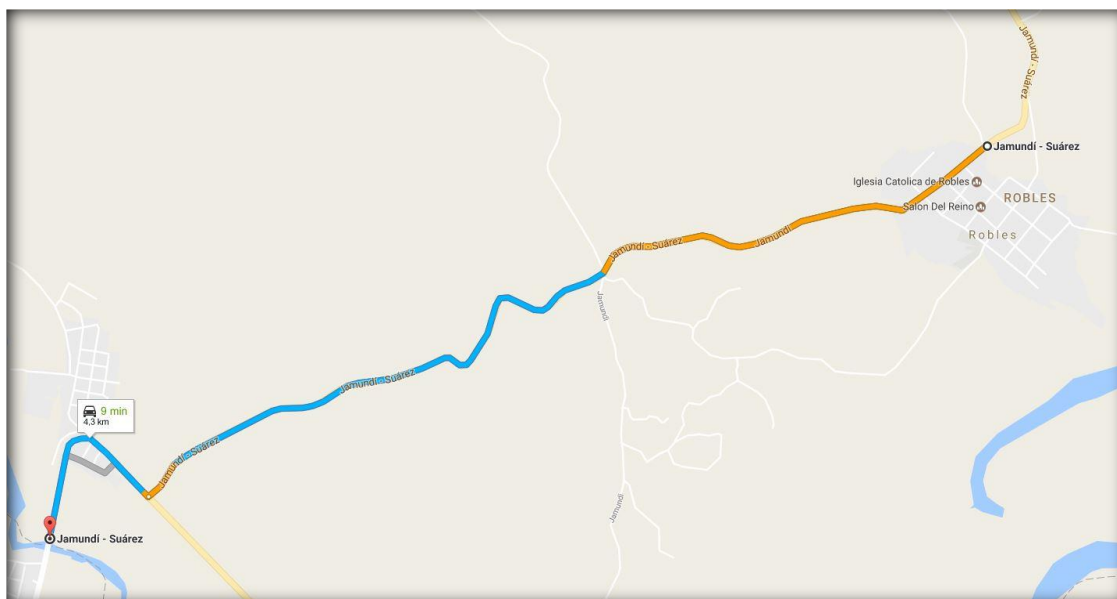


Figura 14 Sector 3. Robles-Timba. Tomado de Google Maps.

7.2 RECOPIACIÓN DE DATOS

La recopilación de datos, inicialmente se realizó mediante actas de pago parciales, que tuvieran información de cantidades totales ejecutadas y costos totales, de igual manera fue posible para algunos proyectos conocer informes de seguimientos y actas de comités, con lo que fue posible establecer rendimientos y costos unitarios para las actividades que componen el proyecto “tipo”. Los criterios que permitieron ordenar la recopilación y clasificación de los datos obtenidos fueron los siguientes:

- **Fecha inicio actividad:** Dato provenientes de bitácora de obra, informes de seguimiento, actas de comités o informe de contratista. Se refiere a la fecha de inicio de la actividad constructiva.
- **Fecha fin actividad:** Dato provenientes de bitácora de obra, informes de seguimiento, actas de comités o informe de contratista. Se refiere a la fecha de terminación de la actividad constructiva.
- **Unidad de medida:** Dato proveniente de acta de pago parcial, análisis de precios unitarios. Se refiere a la unidad de cuantificación de la actividad constructiva.
- **Días calendario:** Dato proveniente de acta de pago parcial, programación de obras. Se refiere a las fechas entre las cuales la actividad estaba programada ejecutarse.
- **Días trabajados:** Dato proveniente de bitácora de obra, informe contratista. Se refiere a los días calendarios laborales que se utilizaron para la ejecución de la actividad.
- **Duración:** Dato proveniente de bitácora de obra, informe interventoría, informe contratista, con el cual se calcula el rendimiento de la actividad. Esta puede provenir de los días calendarios o días trabajados, la utilización de uno u otro depende de la calidad y nivel del dato recopilado.

7.2.1 Fuente, nivel calidad de datos y tratamiento de datos

El proceso de recopilación de datos presentó inicialmente algunas debilidades por que los datos suministrados inicialmente por la secretaria de infraestructura no cumplían con los requisitos mínimos, con los que se pudiese trabajar. Los datos recopilados y el proyecto caso de estudio “proyecto tipo” fueron suministrados por una empresa privada que lleva cerca de 25 años trabajando en la región, donde su especialidad es la construcción de proyectos viales y escenarios deportivos. Los datos recopilados pertenecen a proyectos ejecutados por esta empresa privada y algunos datos recopilados provienen de otras empresas que suministraron actas de pago parciales con el fin de colaborar en la investigación. Estas fuentes mostraron su oposición al suministro de toda la información, debido a la delicadeza de estos proyectos.

La recopilación de datos, comprendió el estudio de 12 proyectos ejecutados entre el 2000 y 2016, su gran mayoría el objeto del contrato es rehabilitación y/o construcción de carretera. Se recolectaron cerca de 638 datos brutos (336 rendimientos y 302 costos unitarios) y después del tratamiento se contó 504 datos (281 rendimientos y 223 costos unitarios). Todos los anteriores datos provienen de principalmente actas de pago parcial, cronograma de obra, bitácora de obra,

informes de seguimiento de contratista e interventoría. Dependiendo de los criterios de orden expresado anteriormente se clasificaron los datos por niveles:

- **Nivel 1 (Confiabilidad regular):** Dato proveniente de acta parcial de pago, donde se expresa la cantidad total ejecutada durante un periodo de tiempo en días calendario. Este dato no es posible confirmar su veracidad con bitácora de obra o informes de seguimiento por la falta de suministro de esta información.
- **Nivel 2 (Confiabilidad bueno):** Dato proveniente de acta de parcial de pago, donde se expresa la cantidad total ejecutada durante un periodo de tiempo. En este dato algunas veces se pudo comprobar su duración real, por medio de la bitácora de obra o cronograma. Por lo anterior algunas veces se utilizó el concepto de días calendario cuando no había información detallada en los informes o bitácora de obra y otras veces días trabajados para el cálculo de su duración cuando existía el seguimiento a la actividad desarrollada.
- **Nivel 3 (Confiabilidad excelente):** Dato proveniente de informe de control de obra o cronograma final de obra actualizado. Cuenta con información detallada de horas trabajadas, cantidades ejecutadas y contratiempos encontrados durante su realización.

La diferencia entre cantidad de datos brutos y la cantidad de datos tratados, radica principalmente en la proporción de la calidad de los datos recopilados. El 35 % son nivel 1, 45% son nivel 2 y 20% corresponden al nivel 3. Esta proporción en el nivel de calidad de datos incide directamente en que tan disperso y atípicos son los datos brutos recopilados.

Mediante el complemento *stattool “Advanced Statistical Analysis for Excel”*, que hace parte del software **DecisionTools Suite 7.5 Industrial**, se crearon los diagramas de caja para identificar los valores atípicos y la dispersión de los datos, una vez realizado este proceso, la cantidad de datos decide que metodología afrontar para la construcción de las funciones de probabilidad:

- Datos recopilados después de filtrarse son menores de 10, la función de probabilidad debe realizarse con la metodología planteada en la sección 5.7.
- Datos recopilados después de filtrarse son más de 10, la función de probabilidad debe realizarse con la metodología planteada en la sección 5.8.
- Datos recopilados después de filtrarse que son clasificados como valores atípicos, fueron descartados de la investigación.

7.3 MODELO DE SIMULACIÓN DE DURACIÓN Y COSTOS DEL PROYECTO

El modelo de simulación desarrollado en la presente investigación tiene las siguientes características:

- Aplicado en Ms Excel.
- Contiene el modo de simulación del programa.
- Tiene implícito los cálculos de tiempos por CPM, diagramas de Gantt, Flujo de fondos, Valor ganado.

- Está asociado al programa de obra.
- Fue sujeto a 5 tipos de simulaciones cada una de 10000 iteraciones.

Inicialmente se tenía la programación inicial de obras suministrada por el contratista, esta no contemplaba el verdadero alcance del proyecto (cantidades de obra). La lógica de la red se reconstruyó, teniendo en cuenta las secuencias y precedencias en actividades y tratando de reducir tiempos muertos de obras, programando el proyecto de tal manera que el uso a la maquinaria fuera el máximo posible. También se reconstruyó la lógica de la ejecución, en la programación de obras inicialmente suministrada por el contratista, comprendía una ejecución continua de las actividades constructivas. Este fue un proyecto invasivo, es decir un proyecto donde la vía intervenida contaba con un tráfico actual y donde se debía intervenir tratando de causar el menor impacto negativo al entorno, por lo anterior el planteamiento del trabajo se realizó por la intervención de tres fases que abarcan la totalidad del alcance del proyecto. Una de las bases para la estructuración del modelo fue las cantidades de obra realmente ejecutadas, como se ha evidenciado en la mayoría de proyectos de licitación pública, no se ejecuta lo que realmente se planifica o programa, por lo tanto los costos del proyecto varían en este aspecto. En el proyecto caso de estudio “Proyecto tipo”, algunas de las cantidades de obras no correspondían a la realidad, otras no fueron ejecutadas y algunas actividades constructivas indispensables no fueron incluidas al alcance inicial del proyecto, afectando directamente el costo y duración.

Debido a la cantidad de datos brutos recopilados, en algunas actividades constructivas solo existían 4 o 6 datos (hubo deficiencia en la cantidad de datos) por lo que fue necesario desarrollar la metodología de la sección 5.9 “Cuando no hay suficientes datos recopilados”. El desarrollo de esta investigación fue simular un modelo que describa en lo mayor posible las condiciones reales de ejecución de las actividades constructivas, aunque algunas actividades “No simuladas” no se les asignó una función de distribución de probabilidad, porque no hacían parte del alcance de la investigación, y serían parte de otros casos de estudios, sin embargo, aun así contribuyen a la red dejando su costo estático y duración constante durante la simulación.

Tabla 4 Presupuesto inicial proyecto "tipo"

ITEM	DESCRIPCION	UND	CANT.	VR. UNIT	VR.TOTAL
1	PAVIMENTO				15.855.706.139,00
1,01	AJUSTES DE ESTUDIOS Y DISEÑOS	GLB	1	114.000.000	114.000.000
1,02	DEMOLICIÓN DE PAVIMENTO RIGIDO (SIN RETIRO)	GLB	73000	24.208	1.767.184.000
1,03	EXCAVACIONES VARIAS SIN CLASIFICAR DE LA EXPLANACIÓN Y CANALES (CAJEO SIN RETIRO)	M3	500	7.140	3.570.000
1,04	TRANSPORTE DE MATERIALES PROVENIENTES DE LA EXCAVACIÓN, CANALES Y PRESTAMOS PARA DISTANCIAS MAYORES A 1000 M	M3K	500	1.567	783.500
1,05	SUBBASE GRANULAR (Incluye acarreo de 10 Km)	M3	21900	74.749	1.637.003.100
1,06	RELLENO PARA ESTRUCTURAS (TRANSPORTE <= 10KM)	M3	8760	33.416	292.724.160
1,07	TRANSPORTE DE MATERIALES PÉTREOS (Sub Base, Base)	M3K	919800	1.516	1.394.416.800
1,08	RIEGO DE IMPRIMACIÓN CON EMULSIÓN ASFALTICA (MC-70)	M2	109500	3.330	364.635.000

1,09	MEZCLA DENSA EN CALIENTE TIPO MDC-2 (Transporte <= 40Km)	M3	16425	430.050	7.063.571.250
1,10	ACARREO ASFALTO VOLUMEN COMPACTADO	M3K	657000	1.516	996.012.000
1,11	MALLA BIAxIAL PARA TENSIÓN EN REFUERZO DE CARPETA ASFALICA TIPO	M2	216810	10.211	2.213.846.910
1,12	TRANSPORTE DE EQUIPO <= 50 KM	T/K	5400	860	4.644.000
1,13	ACERO REFUERZO FLEJADO 60000 PSI 420Mpa	KL5	1000	3.069	3.069.000
1,14	CONFORMACIÓN DE LA CALZADA EXISTENTE	M2	87,6	2.813	246.419
SUBTOTAL PAVIMENTO					15.855.706.139,00

2	OBRAS DE DRENAJE CONSTRUCCION DE ALCANTARILLAS DE 36"				103.905.340,00
2,01	EXCAVACIONES VARIAS SIN CLASIFICAR (A Máquina sin retiro)	M3	457,9	5.991	2.743.279
2,02	RELLENO PARA ESTRUCTURAS (TRANSPORTE <= 10KM)	M3	253,4	33.416	8.467.614
2,03	CONCRETO CLASE E: 2500 PSI (TRANSPORTE AGREGADORS PÉTROS <=10 KM)	M3	53,6	470.119	25.198.378
2,04	CONCRETO CLASE D: 2500 PSI (TRANSPORTE AGREGADORS PÉTROS <=10 KM)	M3	29,6	453.188	13.414.365
2,05	TRANSPORTE DE MATERIALES PÉTREOS -TIERRA - VARIOS	M3K	3129,6	1.516	4.744.474
2,06	TUBERIA DE CONCRETO REFORZADO DE 900 MM DE DIAMETRO INTERIOR (INCLUYE 10 KM DE TRANSPORTE)	M3	96	374.839	35.984.544
2,07	TRANSPORTE TUBERIA D=33" A 36"	M/K	3840	490	1.881.600
2,08	LIMPIEZA A MANO DE ALCANTARILLADO DE TUBO	UND	20	70.218	1.404.360
2,09	LIMPIEZA A MANO DE ENCOLES Y DESCOLES EN TIERRA O EN CONCRETO, CUNETAS Y ZANJAS.	M/K	2970	1.559	4.630.230
2,10	EXCAVACIONES VARIAS SIN CLASIFICAR (MANUAL CON RETIRO EN SITIO)	M3	236	23.036	5.436.496
SUBTOTAL OBRAS DE DRENAJE CONSTRUCCION DE ALCANTARILLAS DE 36"					103.905.340,00

3	PINTURAS, OBRAS DE DEMARCACIÓN				109.260.000,00
3,01	LINEA DE DEMARCACION CONTINUA ANCHO 10CM	ML	45000	2.428	109.260.000
SUBTOTAL PINTURAS, OBRAS DE DEMARCACIÓN					109.260.000,00

4	REFORZAMIENTO PUENTE				86.000.000,00
4,01	REFORZAMIENTO ESTRUCTURA PUENTE	GLB	1	86.000.000	86.000.000
SUBTOTAL PINTURAS, OBRAS DE DEMARCACIÓN					86.000.000,00

VALOR COSTOS DIRECTOS			16.154.871.479
COSTOS INDIRECTOS			
VALOR COSTOS DIRECTOS			16.154.871.479
ADMINISTRACION	18,50%		2.988.651.224
IMPREVISTOS	5,00%		807.743.574
UTILIDAD	8,00%		1.292.389.718
TOTAL AIU	31,50%		5.088.784.516
VALOR TOTAL PROYECTO (PRECIOS 2017)			21.243.655.995

CONVENCIONES UTILIZADAS	
	Actividad programa y ejecutada
	Actividad programa y NO ejecutada
	Actividad NO simulada

Tabla 5 Convenciones utilizadas

Los costos unitarios utilizados fueron actualizados a enero 2017, utilizando el índice de precio de la construcción pesada (IPCC), siguiendo la metodología explicada en la sección 6.3 y 5.7 “Actualización de precios unitarios”. Muchos de los datos recopilados de precios unitarios contaban con los costos indirectos, mediante actas parciales de pago se pudo establecer este porcentaje y descontar al costo unitario, posteriormente se actualizó el precio por medio del IPCC para poder incluirlo en la simulación por medio de una función de probabilidad que más se ajustara a la varianza de los datos recopilados. Los costos unitarios utilizados en la simulación no fueron incluidos el porcentaje de costos indirectos, es decir se trabajó con costos unitarios directos.

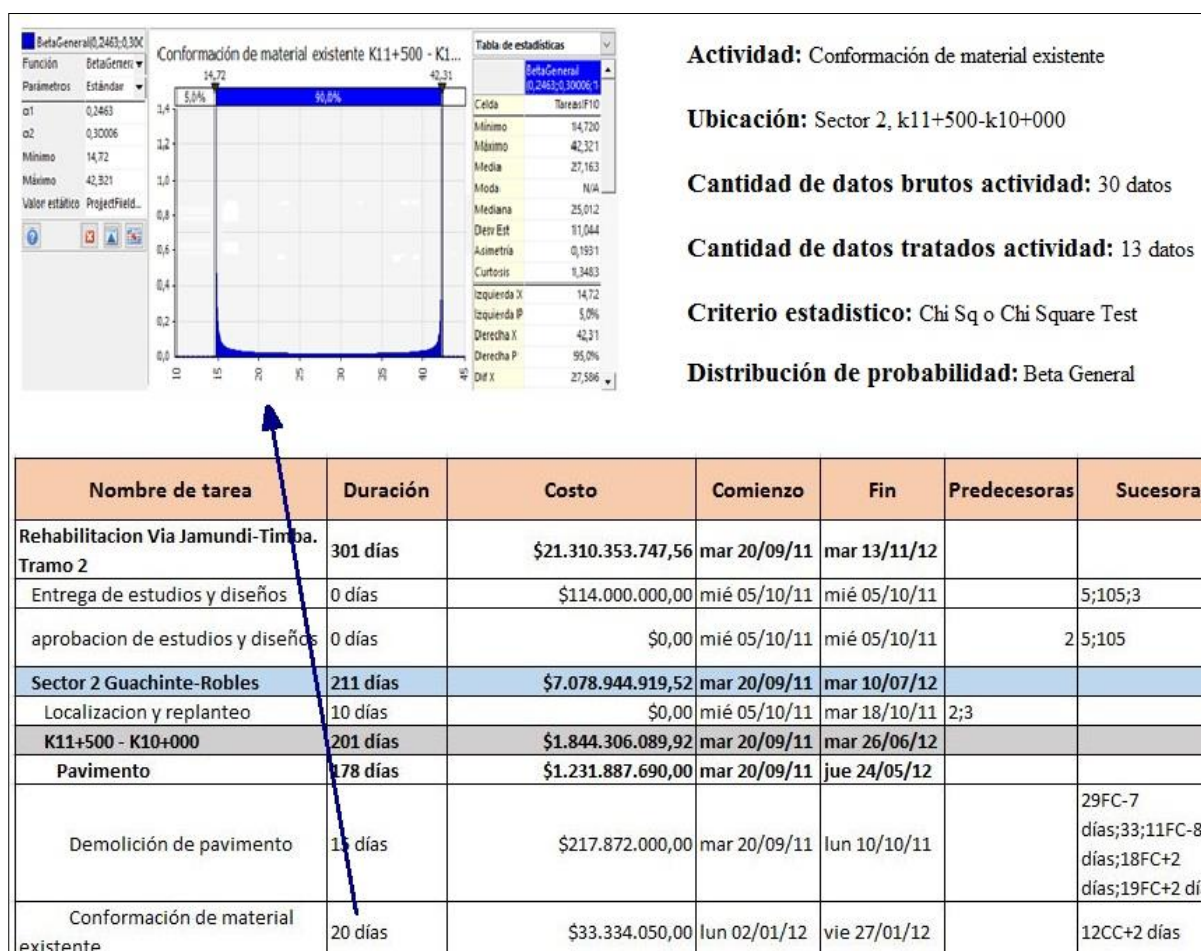


Figura 15 Variables de entrada modelo de simulación de duración real. @Risk 7.5.

La simulación de programación de obras, “Cantidades reales ejecutadas” y “Cantidades programadas” (anexo 2), en estos dos casos las distribuciones de probabilidad de las duraciones de las actividades del proyecto fueron guardadas en las celdas “Duración”, las actividades no simuladas que no correspondieron al alcance de la investigación, no tienen distribución asignada pero su dato constante interactúa con el modelo de simulación. Estas funciones de “distribución” se colocaron en las celdas de la hoja de cálculo y en las fórmulas como se hace con cualquier otra función de Excel. De manera similar el modelo de simulación de costos reales y programados (Anexo 2), fueron guardadas en las celdas “Costo” y al igual que el modelo de simulación de duración, las actividades no simuladas interactúan en el modelo con un valor estático.

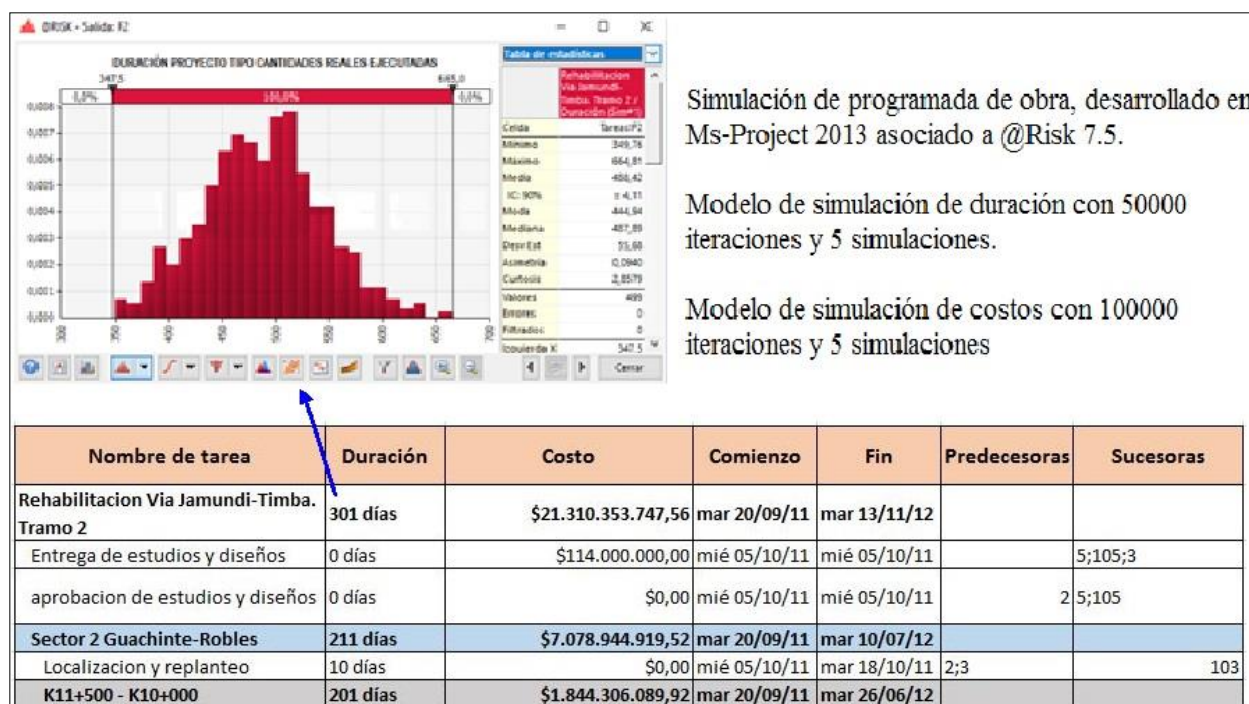


Figura 16 Variable de salida modelo de simulación @Risk 7.5.

En el momento de la simulación las variables de entrada (distribución de probabilidad), adoptan un valor estático elegido aleatoriamente según la distribución de probabilidad escogida. Las variables de entrada del modelo de simulación pueden ser “independientes” o “dependientes”. Una variable independiente no se ve afectada en absoluto por ninguna otra variable del modelo. Por el contrario, una variable dependiente se determina parcial o totalmente dependiendo de una o más variables del modelo.

El análisis de riesgo realizado en @RISK 7.5 generó los resultados en las celdas de las hojas de cálculo de Excel denominadas variables de salida. Los resultados son distribuciones de probabilidad de los valores posibles que se pueden alcanzar. La lógica de la red programada en MS Project 2013 y asociada a @Risk 7.5, permitió que por cada iteración del modelo de simulación se realice el cálculo de la red. Tanto las formulas de la red, como sus actividades predecesoras y sucesoras, permiten calcular la duración total del proyecto y la duración de cada una de sus fases.

En @RISK 7.5, las simulaciones llevan a cabo dos operaciones distintas:

- Selección de una serie de valores para las funciones de distribución de probabilidad de las celdas (variables de entrada)
- Recálculo de la hoja de cálculo de Excel utilizando los nuevos valores

La selección de los valores de las distribuciones de probabilidad se denomina recolectada de muestras y cada nuevo cálculo de la hoja se denomina iteración. El modelo de simulación de duración tuvo 50000 iteraciones y 5 simulaciones, el modelo de simulación de costos tuvo 100000 iteraciones y 5 simulaciones; por cada simulación del modelo las distribuciones de probabilidad tanto de costos como duración, calculaban la duración total del proyecto y costo total del proyecto, utilizando la cantidad real ejecutada y programada inicialmente en el proyecto. Con lo anterior interactuaban ciertos elementos para realizar el cálculo de la red CPM (Anexo 3), el diagrama de Gantt, curvas “s”, indicadores de valor ganado, costo de actividades y todos los criterios desarrollados en el marco teórico de la presente investigación.

7.3.1 Ajuste de distribución de probabilidad e inclusión al modelo de simulación

La incertidumbre de la duración y costos de las actividades constructivas, se incluyen al modelo de simulación realizando el ajuste estadístico de los datos recopilados “*tratados*” de cada actividad constructiva a las distribuciones de probabilidad del complemento @Risk 7.5. Realizando una mejor explicación, a modo de ejemplo se calcula la distribución de probabilidad para los costos directos totales de la actividad “*Concreto clase D k4+500-k6+250*”. En la hoja de Excel, anexo 1 “Datos recopilados costos”, se seleccionaron los datos de interés a estudiar y posteriormente selecciona la ventana “ajustar distribuciones a los datos” (ver figura 11), a lo cual @Risk 7.5, asigna un puntaje a cada una de las funciones de probabilidad que más se ajustan a los datos de entrada (ver ilustración 12), organizándolos de forma jerárquica, de tal forma que a mayor ajuste de la función de probabilidad a los datos de entrada, se obtiene menor puntuación. Este puntaje asignado a las funciones de probabilidad es por cada criterio estadístico de selección explicado en el capítulo 5.8 “Ajuste de distribuciones de probabilidad”.

@RISK - Ajustar distribuciones a los datos

Datos | Distribuciones a ajustar | Bootstrap | Intervalos Chi-Cuad

Conjunto de datos

Nombre: Concreto clase D K4+500-K6+250

Rango: E284:I284

Tipo: Datos muestrales continuos

☐ Valores son fechas

Filtro

Tipo: Ninguno

Figura 17 Ajuste distribución de datos. @Risk 7.5.

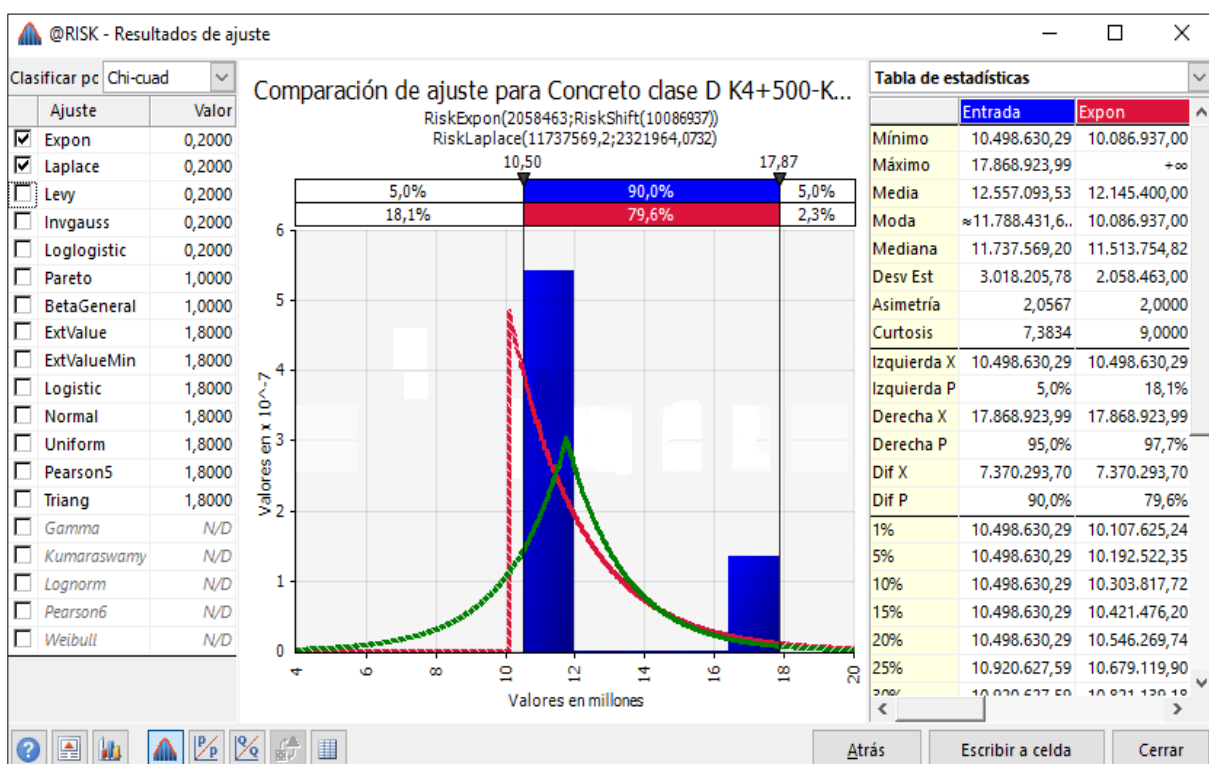


Figura 18 Resultados de ajuste. @Risk 7.5.

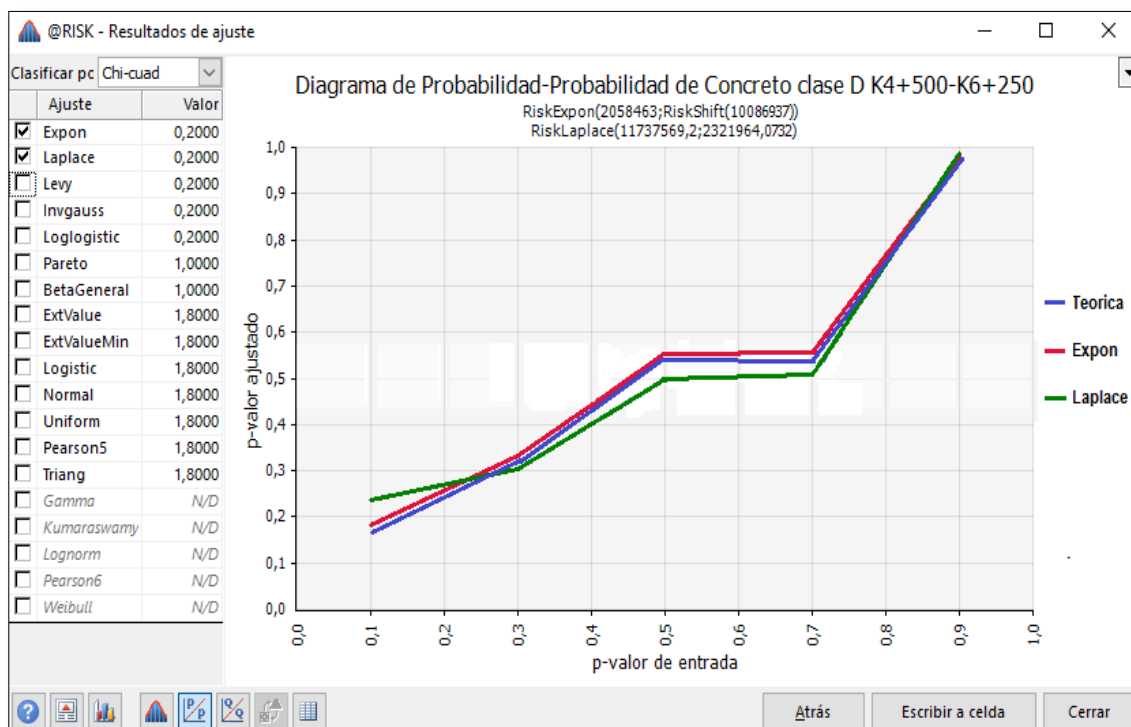


Figura 19 Diagrama probabilidad-probabilidad "P/P". @Risk 7.5.

En la figura 19 “resultados de ajuste”, se muestran las distribuciones de probabilidad que según el proceso estadístico “bondad de ajuste” son las funciones de probabilidad que más se ajustan a los datos, donde según el criterio estadístico “chi-cuad” las funciones de probabilidad “Expon” y “Laplace” obtienen el primer y segundo puesto respectivamente en orden de jerarquización, obteniendo igual puntaje. Para la selección definitiva de la función de probabilidad a utilizar en el modelo de simulación, se utiliza el diagrama probabilidad-probabilidad “P/P”, la recta azul representa la función teórica ideal que representa los datos recopilados y las rectas roja y verde, representa las funciones de probabilidad “Expon” y “Laplace”. En este caso la selección se hace por observación, la que más se parece a la teórica ideal, es la recta roja, es decir la función de probabilidad EXPONENCIAL o “Expon”. En muchos de los casos de la investigación la función que por orden de jerarquización ocupaba el primer lugar no fue la seleccionada, ya que otras funciones de probabilidad se ajustaban mejor gráficamente a los datos recopilados. Los resultados de ajuste de probabilidad para cada actividad constructiva se encuentran en anexo 3 “Tabla de actividades y su distribución”, donde relaciona la cantidad de datos utilizados para realizar el ajuste de probabilidad.

8 ANALISIS DE RESULTADOS

8.1 CASO DE ESTUDIO “PROYECTO TIPO”

En la figura 20 “estructura de composición de trabajo”, el proyecto tipo estuvo dividido en cinco fases, la primera es “**Pavimento**”, donde su alcance es desde la demolición de la carpeta asfáltica

actual, hasta el suministro e instalación de la nueva mezcla asfáltica. La segunda y tercera fase son obras de drenaje, las cuales comprende la construcción de alcantarillado, cunetas y geodren. La cuarta fase “Pintura y obras de demarcación” donde se realizan la señalización horizontal del proyecto. Por último se contempla la fase de reforzamiento de puente.

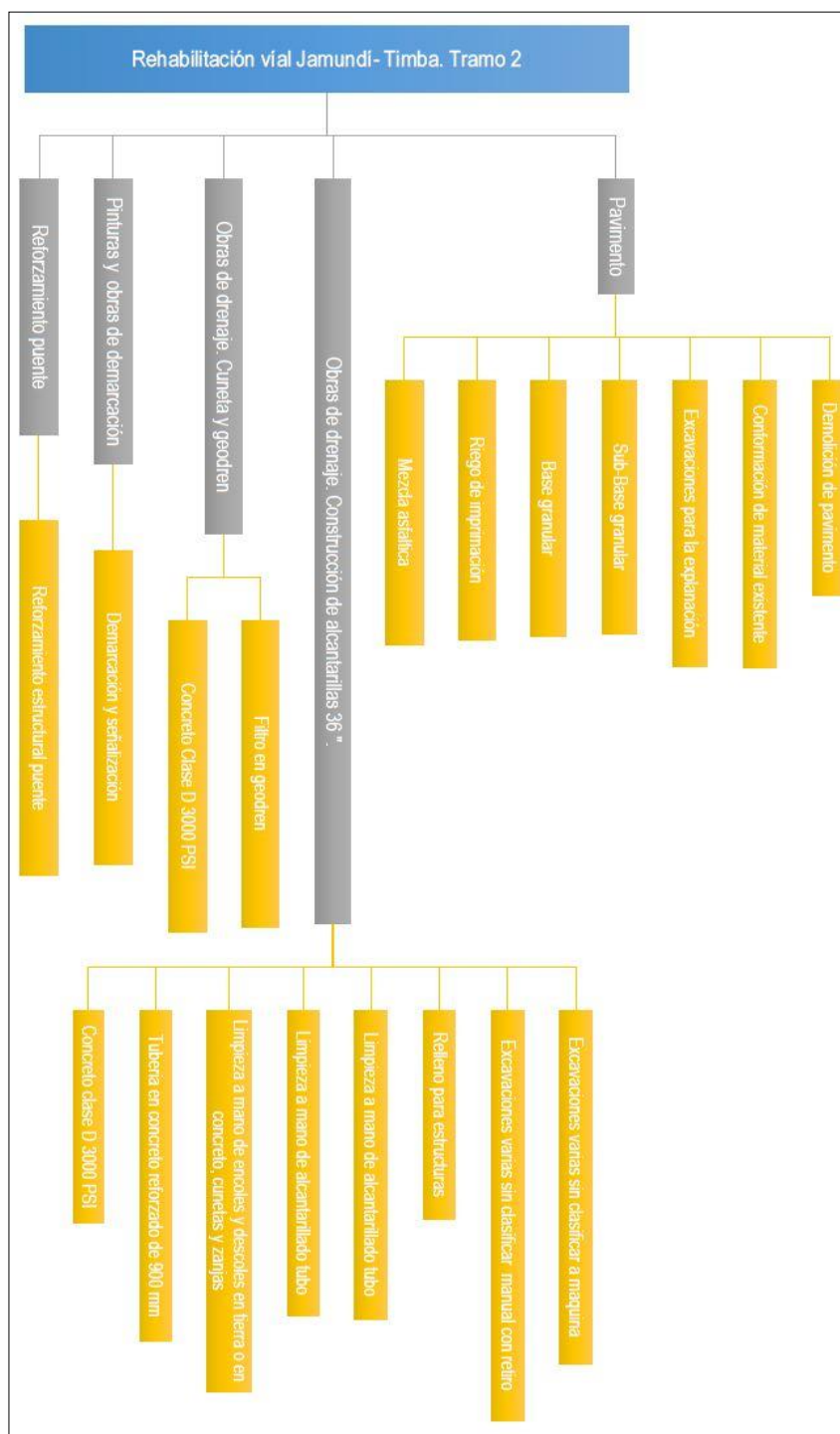


Figura 20 Estructura de descomposición de trabajo "Proyecto tipo".

El “Proyecto tipo” tuvo una programación inicial para ser ejecutado en 420 días calendario, desde 20 septiembre 2011, hasta el 13 noviembre del 2012 con un presupuesto inicial \$21.243.655.955 (pesos enero 2017). El proyecto contó con una fase de pre-construcción no programada de aproximadamente 3 meses, donde se ajustó diseño de vías, alcantarillado y se ajustó las cantidades reales de obra. El “proyecto tipo” fue desarrollado y programado tal como se explicó en la sección 6.2.

Para la realización de esta investigación, por políticas de la empresa no se pudo acceder a las actas de pago del *proyecto tipo*, sin embargo se contó con los informes del contratista, actas de comité de obra e informes de interventoría, donde se pudo establecer un fiel cronograma de seguimiento a la ejecución del *proyecto tipo*. Lo encontrado en dichos informes, se resume en la siguiente tabla 6:

HITO	Fecha	Días trabajados calendario	% Completado programa de obra.	% Completado real
Inicio programado obra	20/09/2011	0,0	0%	0%
Inicio real sector 2	28/09/2011	8,0	0,02%	0%
Acta comité obra	06/11/2011	47,0	1,2%	3%
inicio programado sector 3	01/03/2012	163,0	18%	6,5%
Inicio programado sector 1	05/04/2012	198,0	44%	10,8%
Acta Comité obra	16/05/2012	239,0	51%	18,0%
Inicio real sector 3	18/07/2012	302,0	82%	30,00%
Prorroga de tiempo	03/08/2012	318,0	83%	33,00%
Inicio real sector 1	03/08/2012	318	83%	33,00%
Informe contratista	13/09/2012	359	95%	52,97%
Informe contratista	01/10/2012	377	98%	54,71%
Acta comité obra	18/10/2012	394	99%	56%
Finalización programada	13/11/2012	420	100%	63,00%
Informe contratista	13/12/2012	450		80,00%
Informe contratista	02/07/2013	651		95,00%
Finalización real obra	02/12/2013	804		100,00%

Tabla 6 Control seguimiento obra proyecto tipo.

Realizando un análisis rápido de los informes resumidos en la tabla 6, notamos que entre la fecha de finalización programada y la fecha de finalización real, existe una diferencia de 384 días, es decir la obra finalizó un año y un mes después de lo programado inicialmente; como se puede observar las fechas de inicio programada del sector 2 y 3 no se cumplieron, entre las fechas de inicio real sector 3 y fecha inicio programada 3, existe un desfase de 139 días, y entre las fechas de inicio real del sector 1 y fecha de inicio programada del sector 1, existe un desfase de 120 días. Lo que se puede concluir rápidamente es que la ejecución del contratista no se ajustaba por el

programa de obra. Al graficar los datos de la tabla 6 “Control seguimiento obra *proyecto tipo*”, los días trabajados respecto a los porcentajes de avance de obra programado y real, se puede dar una mayor claridad a lo expresado anteriormente.

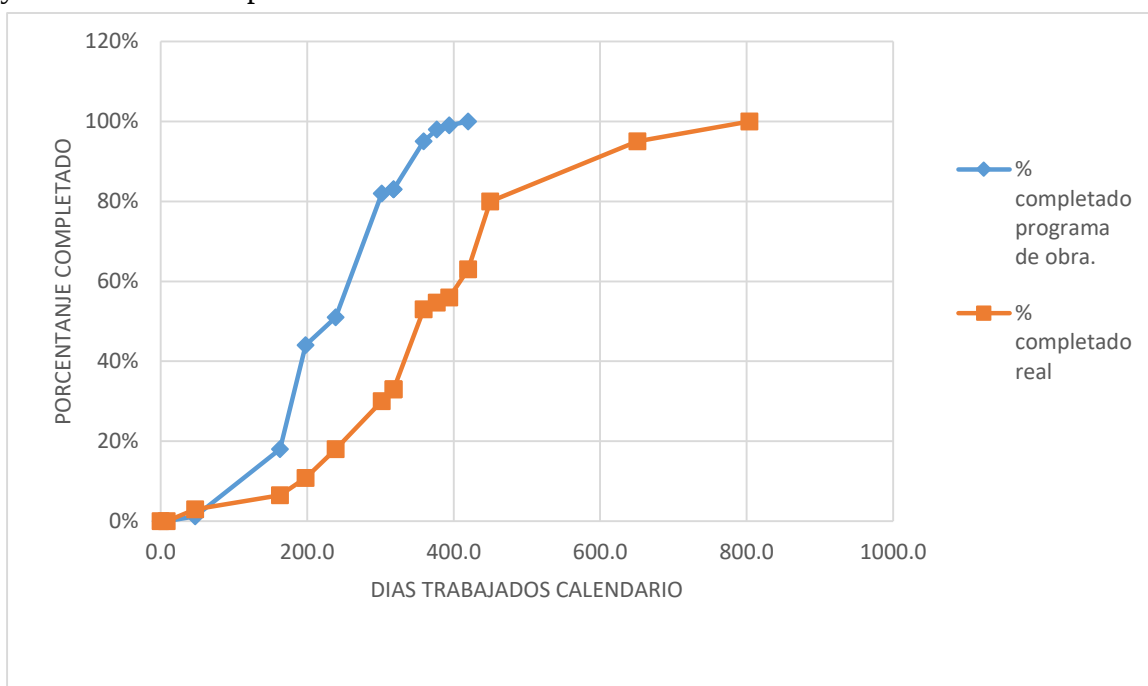


Figura 21 Grafica control seguimiento de obra proyecto tipo.

Al inicio del proyecto, el porcentaje de avance programado fue menor al avance real, pero a partir del 10 de octubre casi un mes después de su inicio, esta diferencia comienza a volverse negativa, es decir se comienza a notar un atraso con respecto a lo programado, donde cada día esta diferencia se acentúa más, si observamos un hito de corte como el *inicio real del sector 1*, el 03/08/2012 entre lo programado y lo realmente ejecutado existía una diferencia del 50%, donde con el pasar de los días esta diferencia cada vez fue más grande.

Ante la situación descrita anteriormente se abre un amplio abanico de conclusiones, entre ellas se podría concluir que las cantidades de obra realmente ejecutadas fueron mucho mayor a las cantidades de obra programadas inicialmente, ya que su presupuesto oficial pasó de \$21.243.655.995 a \$26.846.868.695.78, donde hubo un incremento de \$5.603.212.700.78 (Pesos enero 2017). La tabla 7, contiene las actividades de obra realmente ejecutadas, donde en la columna 3 contiene el porcentaje de incidencia de la actividad dentro del presupuesto ejecutado. Las actividades que se adicionaron, tanto como las mayores cantidades ejecutadas representan el 20.87% del presupuesto realizado; una conclusión rápida podría ser que las mayores cantidades de obras representadas en los capítulos adicionados 5 y 6, y en la actividad base granular son las causantes del retraso de la obra, pero el contratista no pudo entregar en su alcance básico (**Pavimento**) las obras a tiempo, como se vio anteriormente la diferencia entre el inicio del sector 2 y 3 fue casi 139 días y 120 días respectivamente, un desfase del 50% con respecto a lo programado. Por esto, este enfoque no es muy acertado, ya que también hubo actividades de obras

que se programaron inicialmente y no ejecutaron, estas obras **No ejecutadas** representaban el 11.8 % del presupuesto inicial. La programación de obras del *proyecto tipo*, contemplaba el verdadero alcance del proyecto, tanto en costos como cantidades de obra; además el incremento en el precio puede conducir a muchas hipótesis, como aumento de los costos unitarios por actualización de precios al año de finalización de obra, incremento (exagerado) por actualización de precios a 2017 o actos de corrupción cometidos durante su realización. Por lo anterior se hace importante identificar y conocer las razones de porque se vio afectado la duración inicial del proyecto, para evitar este tipo de conclusiones apresuradas.

1.0 PAVIMENTO		61,62%
DEMOL.PAVIMENTO CONCRETO E=15CM +RET	M2	5,97%
EXCAVACIONES VARIAS SIN CLASIFICAR DE LA EXPLANACIÓN Y CANALES (CAJE O SIN RETIRO)	M3	0,63%
TRANSPORTE DE MATERIALES PROVENIENTES DE LA EXCAVACION, CANALES Y PRÉSTAMOS PARA DISTANCIAS MAYORES A 1000 MTS	M3	2,39%
SUB-BASE COMPACT.MAT.SELECC.10K-INVIAS NO	M3	14,62%
BASE COMP.MAT. TRITURAD GRANUL ACARR 10K	M3	10,19%
TRANSPORTE DE MATERIALES PETEROS (SUBBASE-BASE)	M3-KM	2,46%
RIEGO DE IMPRIMACION CON EMULSIÓN ASFALTICA MC-70	M2	1,91%
MEZCLA Densa EN CALIENTE TIPO MDC-2 (SUMINISTRO A 40KM)	M3	19,49%
ACARREO ASFALTO VOLUMEN COMPCTADO	M3K	1,24%
GEOMALLA BIAxIAL PARA TENSIÓN EN REFUERZO DE CARPETA ASFÁLTICA TIPO LB 302 O SIMILAR	M2	0,06%
ACERO REFUERZO 60000 PSI 420Mpa	KLS	0,17%
CONCRETO MR=45 PARA LOSA	M3	1,21%
GEOTEXTIL TEJIDO 1700	M2	0,07%
SELLO DE JUNTAS PARA LOSA EXISTENTE	ML	0,01%
CONFORMACIÓN CALZADA EXISTENTE	M2	1,21%
2.0 OBRAS DE DRENAJE- CONSTRUCCIÓN DE ALCANTARILLAS DE 36"		1,95%
EXCAVACION A MAQUINA SIN RETIRO (A MAQUINA SIN RETIRO)	M3	0,02%
EXCAVACIONES VARIAS SIN CLASIFICAR (MANUAL CON RETIRO EN SITIO)	M3	0,13%
RELLENO PARA ESTRUCTURAS (TRANSPORTES <= 10KM)	M3	0,08%
CONCRETO CLASE E=2500 PSI (TRANSPORTE AGREGADOS PÉTREOS <= 10 KM)	M3	0,57%
CONCRETO CLASE D=3000 PSI (TRANSPORTE AGREGADOS PÉTREOS <= 10 KM)	M3	0,31%
TRANSPORTE DE MATERIALES PETEROS (SUBBASE-BASE)	M3-KM	0,04%
TUBERIA EN CONCRETO REFORZADO DE 900 MM DE DIAMETRO INTERIOR (INCLUYE 10 KM DE TRANSPORTE)	ML	0,64%
TRANSPORTE DE TUBERIA D=33" A 36"	M/K	0,03%
LIMPIEZA A MANO ALCANTARILLA DE TUBO	UND	0,02%
LIMPIEZA A MANO DE ENCOLES Y DESCOLES EN TIERRA O EN CONCRETO, CUNETAS Y ZANJAS	ML	0,10%
3.0 OBRAS DE DRENAJE- CONSTRUCCIÓN DE BERMA CUNETAS EN CONCRETO Y GEODRENES		9,92%
EXCAVACIONES VARIAS SIN CLASIFICAR (MANUAL CON RETIRO EN SITIO)	M3	0,32%
CONCRETO CLASE D=3000 PSI (TRANSPORTE AGREGADOS PÉTREOS <= 10 KM)	M3	3,73%
TRANSPORTE DE MATERIALES PETEROS	M3-KM	0,16%
FILTRO GEODREN(INCLUYE EXCAV.Y RELLENO)	ML	5,64%
CUNETA EN TIERRA (MANUAL)	ML	0,07%
4.0 SEÑALIZACIÓN		0,63%
LINEA DE DEMARCACION CON PINTURA EN FRIO	ML	0,27%
SEÑALIZACION VERTICAL	UND	0,36%
5.0 OBRAS DE DRENAJE CONSTRUCCIÓN DE BOX COULVERT		1,08%
BOX COULVERT CONCRETO DE 3000 PSI	M3	0,86%
ACERO REFUERZO 60000 PSI 420Mpa	KLS	0,21%
6.0 OBRAS DE CONTENCIÓN Y PROTECCIÓN DE TALUDES		0,86%
GAVIONES CALIBRE 12	M3	0,80%
PRADO GATEADORA	M2	0,02%
RECUPERACION SUELO - ABONO	M2	0,00%
SUMINISTRO E INSTALACION TIERRA AGRICOLA	M3	0,03%

Tabla 7 Actividades ejecutadas proyecto tipo.

Actividad programa y ejecutada	
Actividad programa y NO simulada	
Actividad NO simulada	

Tabla 8 Convecciones utilizadas

En la tabla 7, las actividades No simuladas, representan el 0.05% del presupuesto ejecutado y su terminación no es representativo para la finalización de la obra, estas actividades no fueron simuladas, ya que no corresponden al alcance de la investigación. Las actividades programadas y No simuladas, representan el 9.14 % del presupuesto ejecutado, estas actividades no tienen distribución de probabilidad, pero su duración está presente como valor estático que interactúa durante cada simulación e iteración.

En la tabla 7, se identifican cuales son actividades constructivas más influyentes en el *proyecto tipo*, sin duda alguna con un 61.62% el capítulo “**Pavimento**”, es el más influyente del *proyecto tipo*, de este se desprenden actividades como mezcla asfáltica con un 19.49 %, sub-base con un 14.62 %, base con un 10.19 %. El capítulo “Obras de drenaje- construcción de alcantarillas 36”” tiene una influencia del 9.92% del presupuesto, en este capítulo la actividad más influyente es filtro en geodren con un 5.64%. En conjunto estos dos capitulos representan el 71.54 % del presupuesto y sus actividades más representativas tienen una influencia del 54.42% sobre el presupuesto realizado.

En esta investigación no es posible realizar un análisis de la calidad de desarrollo del *proyecto tipo*, sin embargo a medida que se ha mostrado el desarrollo del proyecto tipo se han presentado algunos interrogantes con el objetivo de conocer por qué se vio afectado los objetivos del proyecto (Alcance, tiempo, costo y calidad). A lo largo del documento se ha desarrollado herramientas que ayudaran a conocer que afectó directamente el alcance del proyecto (Actividades no realizadas) o si no hubo una buena estimación en la duración total del proyecto (La duración final se extendió 420 días más de lo programado inicialmente). El proyecto caso de estudio, es un excelente ejemplo que nos ayuda a conocer la realidad del país, ya que esta problemática afecta diariamente a la gran mayoría de proyectos de obras civil que se realizan.

8.2 SIMULACIÓN DEL PROYECTO ANTES DE LA PROGRAMACIÓN

Al momento de iniciar un proyecto, teniendo en cuenta cantidades de obra y especificaciones técnicas, se puede realizar un análisis inicial con el objetivo de conocer cómo debería programarse el proyecto, teniendo en cuenta la simulación Monte Carlo y respondiendo a diferentes interrogantes como ¿Que tan confiable es la duración inicial estimada?, ¿Cuáles son las actividades constructivas con más influencia en la duración del proyecto?, o ¿Qué actividades pueden acelerarse para obtener mayores ganancias?. Todos estos interrogantes se pueden solucionar, siempre y cuando el contratista realice un análisis de riesgo con simulación Monte Carlo antes de la ejecución del proyecto y tome en cuenta estos resultados con el fin de optimizar su ejecución y obtener mejores ingresos.

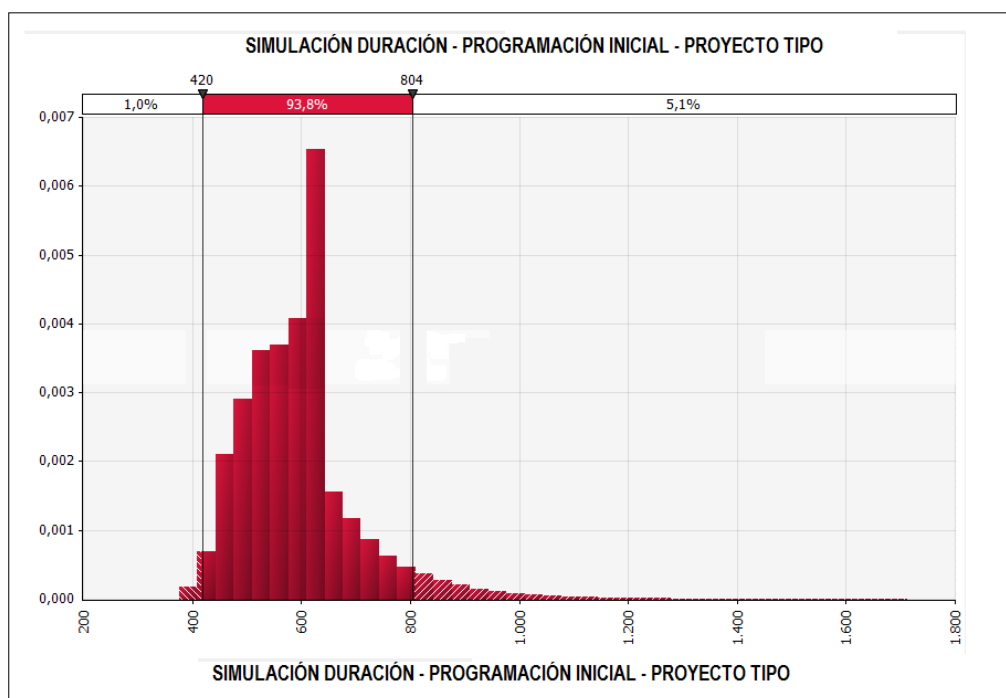


Figura 22 Distribución de densidad de probabilidad - duración proyecto - Programación inicial. @Risk 7.5.

La figura 22 es la distribución de probabilidad alojada en la variable de salida, es decir es el resultado de la simulación Monte Carlo realizado con las cantidades iniciales de obra y programación inicial realizada por el contratista. Con la distribución de densidad de probabilidad (figura 21), le permite a los contratistas, que la duración tanto de las actividades constructivas como la duración total del proyecto deje de ser una estimación determinística y sea únicamente dependiente del riesgo que esté dispuesto a asumir. Esta estimación probabilística se puede centrar en datos de interés que pueden ser impuestas por la entidad contratante, por ejemplo en la figura 21, el análisis de la gráfica se centra en la duración inicial del proyecto (420 días) y la duración final del proyecto (804 días).

Antes de iniciar el proyecto la entidad contratante impuso al contratista la duración inicial de 420 días calendario, según la figura 22 “Distribución de densidad de probabilidad” esta duración durante la etapa de planeación y programación seguramente hubiese sido desestimada de inmediato, la duración inicial estimada por la entidad contratante de 420 días, tenía una probabilidad de cumplimiento del 1%, con un riesgo asociado a tomar esta duración del 99%, es decir la duración inicial del proyecto tenía una probabilidad del 99% de tomar duraciones mayores a 420 días.

El proceso de programación por medio del análisis probabilístico producto de la simulación Monte Carlo, consiste en realizar una estimación del riesgo asociado a la duración del proyecto del cual el contratista esté dispuesto asumir, por ejemplo si el contratista hubiese pensado en asumir un riesgo del 20%, con ayuda de la figura 21, ubicamos en el eje superior horizontal la probabilidad 80% y buscamos en el eje inferior horizontal la duración perteneciente a esta probabilidad. Para el ejemplo la duración correspondiente al 80% de probabilidad es 645 días, que tiene una diferencia

con la duración real de 159 días. Todo esto conduce que a pesar que al inicio de la obra el presupuesto se ajustó y se encontraron mayores cantidades de obra, la estimación en la duración total del proyecto era muy baja y con una alta probabilidad de incurrir en retrasos, a pesar de no realizar mayores cantidades de obra.

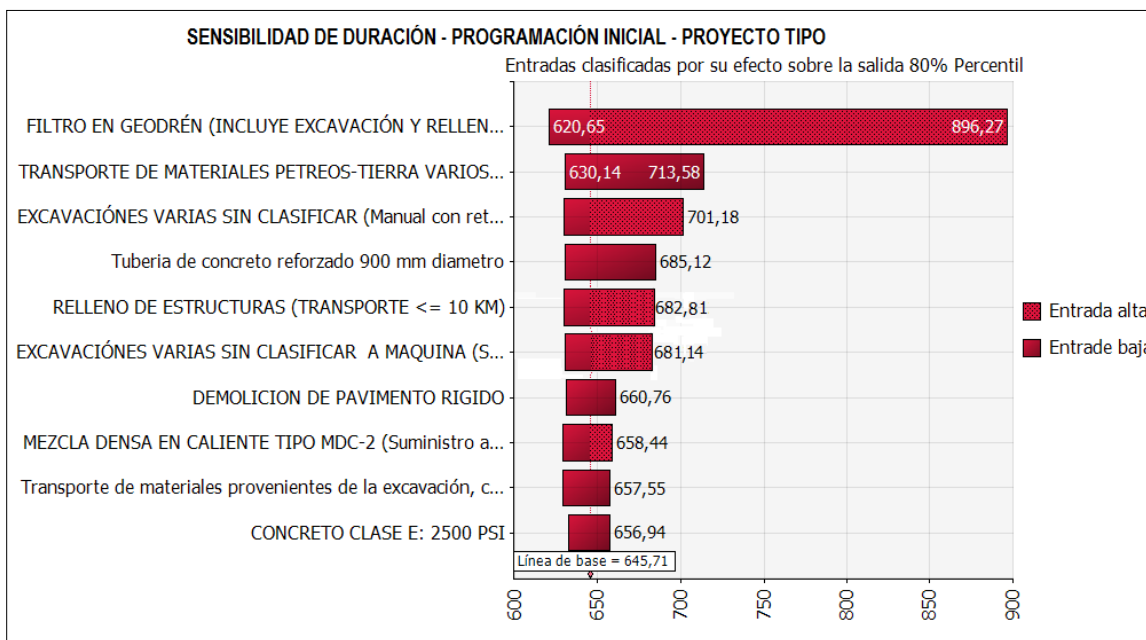


Figura 23 Análisis de sensibilidad - Cantidades iniciales - Proyecto tipo. @Risk 7.5.

El proceso de programación de obras, no solamente corresponde a la buena estimación de la duración de un proyecto, si es por motivos competitivos o para obtener mayores utilidades se debe conocer los impactos y duración de cada actividad constructiva. La figura 23, corresponde al análisis de sensibilidad de las actividades constructiva sobre la duración del proyecto, tomando como línea base la duración correspondiente a la probabilidad del 80% recomendada de cumplimiento (645 días). En la figura 22, se establecen límites superiores o inferiores del rango de posibles duraciones para las actividades más influyentes del proyecto sobre la duración. En la programación inicial, la actividad más incidente sobre la duración del proyecto es “filtro en geodren”, un buen desempeño en esta actividad podría significar la terminación del proyecto en 620 días, cerca de 25 días antes de la duración recomendada, sin embargo un mal desempeño en esta actividad podría significar el aumento de 252 días en la duración recomendada del proyecto. En este punto de la programación es posible para el contratista realizar un balance económico y seleccionar que actividad constructiva desea acelerar con el objetivo de obtener mejores ingresos o cumplir con los tiempos estimados de entrega. Dependiendo de la lógica del modelo CPM, unas actividades son más influyentes que otras, esto también puede deberse a las grandes cantidades de obra a ejecutar.

La figura 24, presenta los coeficientes de correlación jerárquica de las actividades constructivas respecto a la duración total del proyecto tipo (Programación inicial), entre más alto sea este coeficiente, más sensible es la duración del proyecto al desempeño de la actividad constructiva.

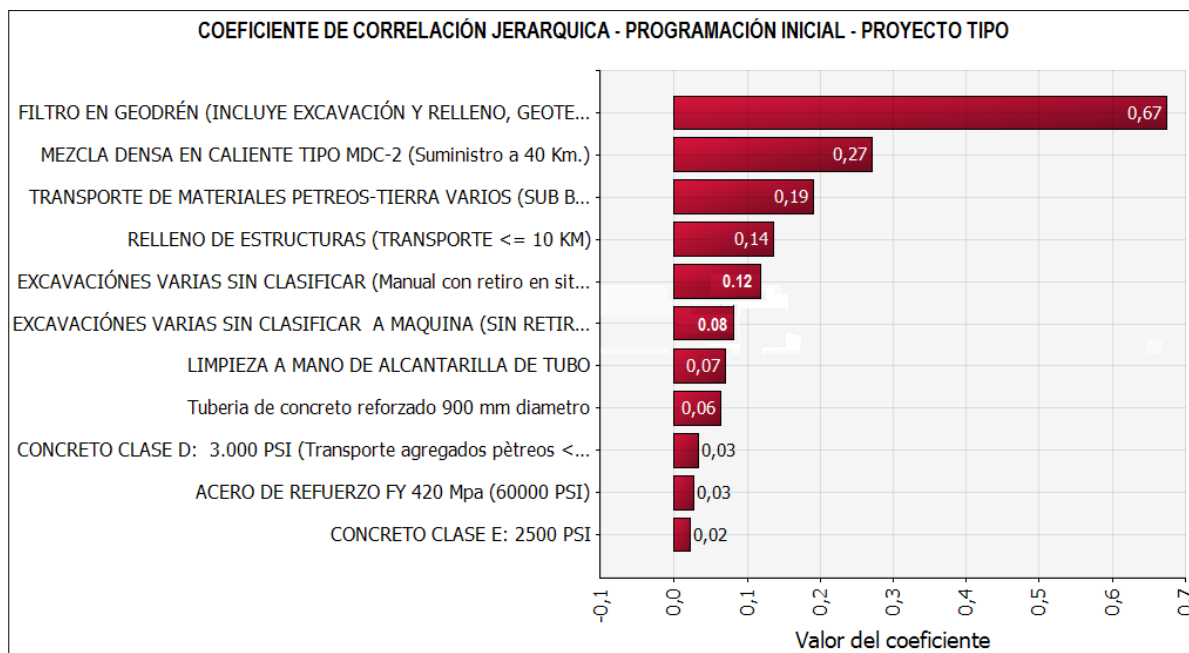


Figura 24 Coeficiente de relación jerárquica. @Risk 7.5.

Las actividades más influyentes según el coeficiente de organización jerárquica, son filtro en geodren, mezcla densa en caliente y transporte de materiales pétreos, lo cual reafirma en parte a lo mostrado en la figura 23, la organización por coeficiente de corrección jerárquica no es totalmente idéntica a lo mostrado en el análisis de sensibilidad, el análisis de sensibilidad depende principalmente de la lógica de la red CPM, mientras el coeficiente de correlación jerárquica depende principalmente de los rendimientos de las actividades constructivas y de las cantidades de obra a ejecutar. Teniendo en cuenta la figura 24, para el contratista sería conveniente incluir contingencias (Tiempos flotantes) en las duraciones de las actividades, con el objetivo de solucionar posibles problemas durante la ejecución de las actividades más influyentes del proyecto.

Descripción de la actividad	Índice crítico
Demolición de pavimento rígido (sin retiro)	36,88%
Conformación de la calzada existente	35,83%
Subbase granular (Incluye acarreo de 10 km)	35,83%
Excavación varias sin clasificar (a máquina sin retiro)	33,6%
Riego de imprimación con emulsión asfáltica (MC-70)	32,36%
Mezcla densa en caliente tipo mdc-2 (Suministro a 40 km)	30,54%

Tabla 9 Índice crítico actividades constructivas - Proyecto tipo

La probabilidad que tiene cada actividad constructiva de pertenecer a la ruta crítica con base a los datos generados por la simulación Monte Carlo, se analiza por el diagrama de Gantt probabilístico. Un índice crítico mayor al 70% representa un riesgo alto de que una mala ejecución de una actividad conduzca a volverla crítica dentro de la programación. En la tabla 9, se muestran el índice crítico de las actividades constructivas para la programación inicial, la actividad demolición de pavimento rígido tiene el mayor índice crítico de todas las actividades a ejecutar, sin embargo el porcentaje es muy bajo como para tenerlo en cuenta. Con lo anterior, el contratista puede decidir cambiar la red CPM, con el objetivo de acelerar la duración total del proyecto, asumiendo un mayor riesgo de probabilidad de que algunas actividades pertenezcan a la ruta crítica.

8.3 ANALISIS SIMULACIÓN DEL PROYECTO DE EJECUCIÓN

Al realizar la simulación Montecarlo con los datos iniciales y finales de ejecución del *proyecto tipo*, se puede evaluar el desempeño que tuvo la ejecución del proyecto con los resultados de los análisis probabilísticos alojados en las variables de salida. El enfoque del análisis se centra en los datos de interés tabla 6 “Control seguimiento obra proyecto *tipo*”, capítulo 7.1, sobre lo cual es posible comparar lo programado con lo realmente ejecutado tanto en duración como el costo total del proyecto.

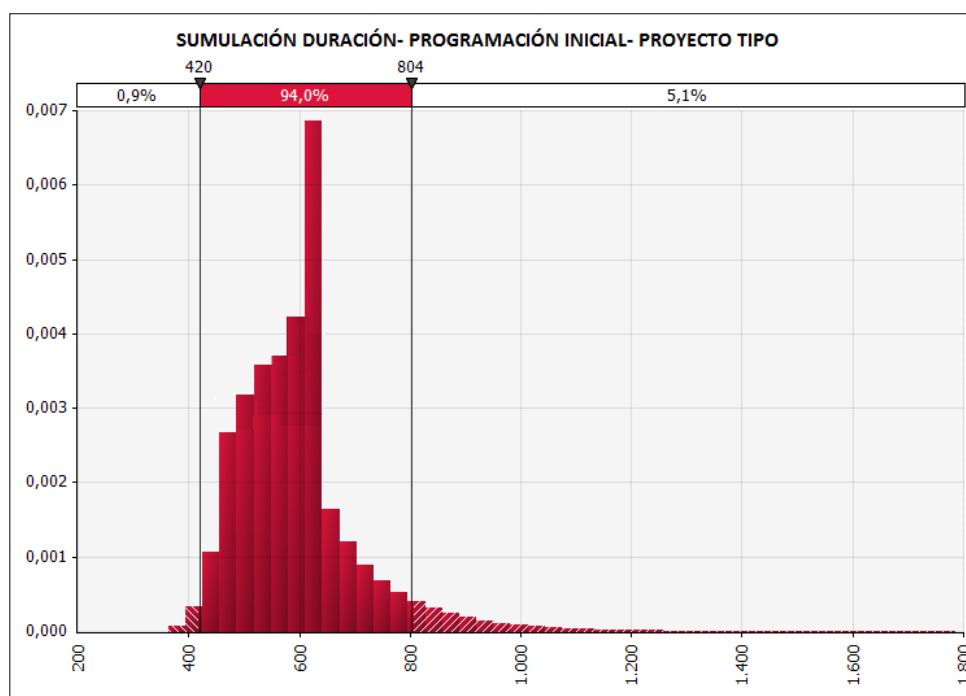


Figura 25 Simulación duración programación inicial proyecto tipo. @Risk 7.5.

La figura 25, es la distribución de probabilidad del resultado de la simulación de duración de la programación inicial del *proyecto tipo*, las guías verticales de la figura 25, se centran para evaluar lo que sucedió con el valor programado inicialmente (420 días) y realmente ejecutado (804 días). Aunque se ejecutaron mayores cantidades de obra y se adicionaron actividades constructivas que

representaron el 20.87% del presupuesto final ejecutado, es claro que la estimación determinísticas de 420 días era muy poco probable que ocurriera (0.9%), a diferencia de la situación final de ejecución que realmente sucedió (94.9%). Todo esto quiere decir, que la estimación determinística de duración de 420 días calendario del *proyecto tipo* realizada por la entidad contratante y contratista, fue estimada con una duración poco probable. Aunque no es del alcance de la investigación, en este punto tanto la entidad contratante como el contratista podrían darse cuenta que tan factible es el cumplimiento de un plazo estimado para un proyecto a ejecutar y así disminuir riesgos en el no cumplimiento de fechas de entrega.

La figura 26, es la distribución de probabilidad del resultado de la simulación de duración con las cantidades de obra realmente ejecutadas y con la programación de obra optimizada descrita en el capítulo 6.1, donde la lógica de la red se reconstruyó, teniendo en cuenta las secuencias y precedencias en actividades y tratando de reducir tiempos muertos de obras, programando el proyecto de tal manera que el uso a la maquinaria fuera el máximo posible. En esta simulación la duración inicial del proyecto de 420 días tiene una probabilidad del 9% mientras la duración final del proyecto tiene 100 % de probabilidad de ocurrencia. La estimación determinística inicial siguió siendo muy poco probable (9%), sin embargo quedó demostrado que a pesar de contar con mayores cantidades de obra, con un buen análisis del proyecto y una buena gestión de proyecto era posible mejorar los rendimientos del proyecto e incrementar la probabilidad de ocurrencia para las fechas iniciales estimadas.

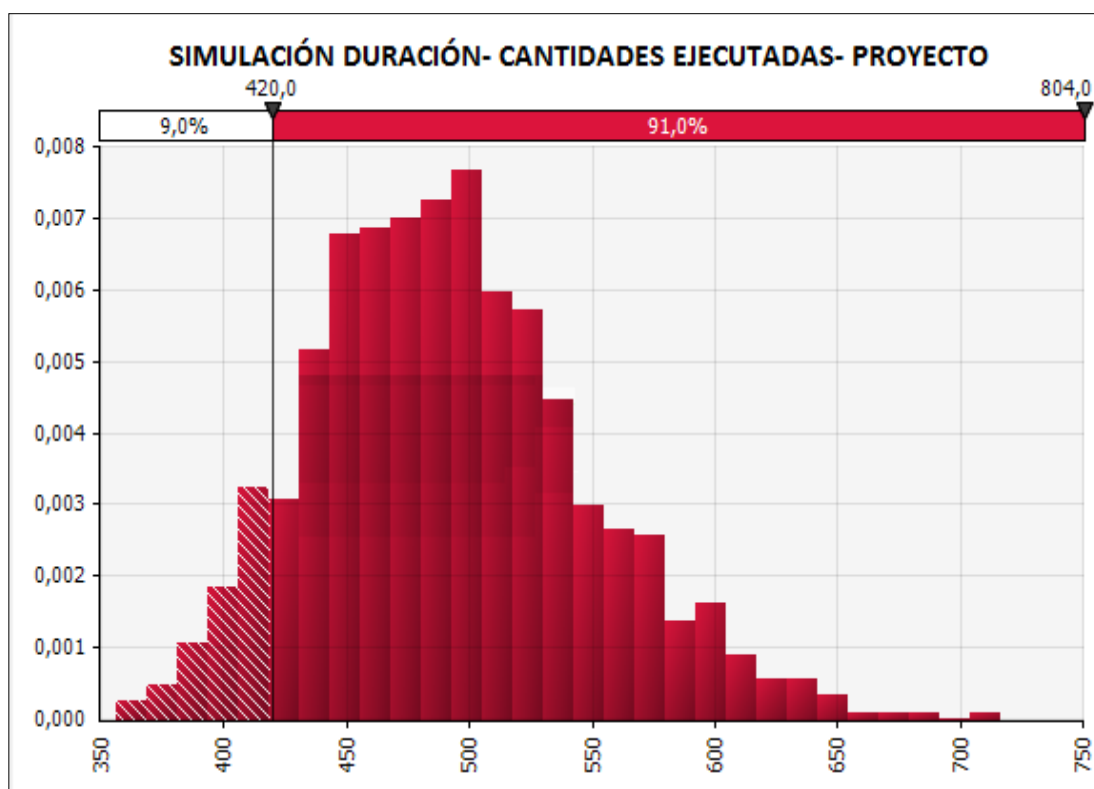


Figura 26 Simulación duración cantidades ejecutadas proyecto. @Risk 7.5.

Parámetro	Valor	Probabilidad <=
Mínimo	357,63	0%
Mediana	490,6	52%
Máximo	658,72	100%
Moda	493,41	53%
Media	487,28	50%
# Iteraciones	100000	-
# Simulaciones	5	-

Tabla 10 Tendencia central de datos. Simulación duración cantidades ejecutadas.

La simulación Montecarlo realizada con cantidades reales de obra y programación optimizada (figura 26), en este caso la curva de distribución de probabilidad continua se vuelve asíntota a partir del día 658, es decir que a partir de este día cualquier duración mayor a 658 días tiene una probabilidad de ocurrencia del 100%, por lo anterior la duración real 804 días tiene una probabilidad de ocurrencia del 100%. De lo anterior se puede concluir, que el contratista no solamente tuvo un retraso de 384 días calendario con respecto a la programación inicial, sino que utilizó mayor tiempo del realmente necesario para terminar el proyecto con su alcance actualizado.

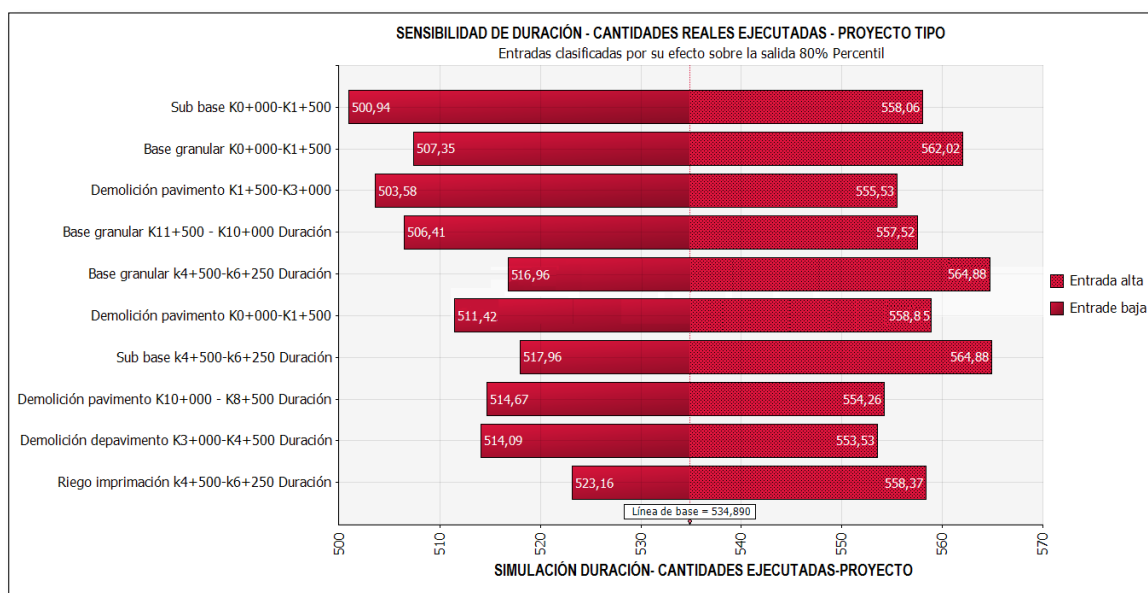


Figura 27 Sensibilidad de las actividades en la duración del proyecto. @Risk 7.5.

Las variables analizadas hasta el momento solo incluyen los resultados guardados respecto a la información de ellas mismas. La figura 27, muestra el análisis de sensibilidad con respecto a la duración más probable del proyecto (534 días), por medio del análisis de sensibilidad el software @RISK 7.5 permite encontrar la relación entre las variables de entrada (rendimientos, costos unitarios) y su efecto directo sobre la variable de salida, con esto es posible conocer que suceden con todas las variables del modelo de simulación y como afectan el tiempo y costo del proyecto. Con los resultados de la simulación Monte Carlo alojados en la variable de salida (figura 26), se puede establecer un nivel de riesgo asociado a la duración del proyecto que garantice un tiempo flotante necesario, que en caso de no obtener un buen desempeño en algunas de las actividades

críticas, exista poco riesgo en el incumplimiento de la fecha de entrega. Al seleccionar una duración con una probabilidad de 80% de cumplir, la duración sería 534 días, esto implicaría un riesgo asociado a esta decisión del 20 % de probabilidad a superar esta duración seleccionada.

La figura 27, establece límites superiores e inferiores que podrían resultar de una buena o mala ejecución del proyecto. La figura 27 muestra que las actividades más influyentes en la terminación del proyecto es Sub base k0+000-k1+500, Sub base k0+000-k1+500, Demolición pavimento k1+500-k3+300. Al analizar más profundamente la figura 27, se encuentra que todas las actividades son pertenecientes al alcance básico del proyecto “pavimento”, además las actividades pertenecen al sector 1 y sector 2 del proyecto. Esto es debido principalmente a las grandes cantidades de obra a ejecutar y a la lógica del modelo CPM desarrollado durante la planeación y programación del *proyecto tipo*.

Al realizar la programación con una duración con un 80% de probabilidad de cumplimiento y analizando la sensibilidad de las actividades en la duración del proyecto, un buen desempeño en la actividad Sub base k0+000-k1+500 podría haber reducido la fecha de entrega real del proyecto en 500 días, disminuyendo todos los efectos por el incumplimiento en la terminación oportuna de entrega, por otro lado un mal desempeño podría haber aumentado la duración 559 días. Las demás actividades influyentes en la duración del proyecto (figura 27), muestran también rangos inferiores y superiores, el buen desempeño del contratista en la ejecución de estas actividades tendría un gran efecto en la duración total del proyecto. En este punto es claro, que físicamente era imposible cumplir con la fecha de terminación (420 días), ya que era muy poco probable (9%). Sin embargo es claro que si el contratista hubiese acelerado o realizado un buen desempeño en las actividades más influyentes sobre la duración del proyecto, se podía disminuir todos los efectos negativos por el incumplimiento de la fecha de entrega, donde posiblemente se hubiese tenido un menor atraso, con respecto al que se presentó (386 días).

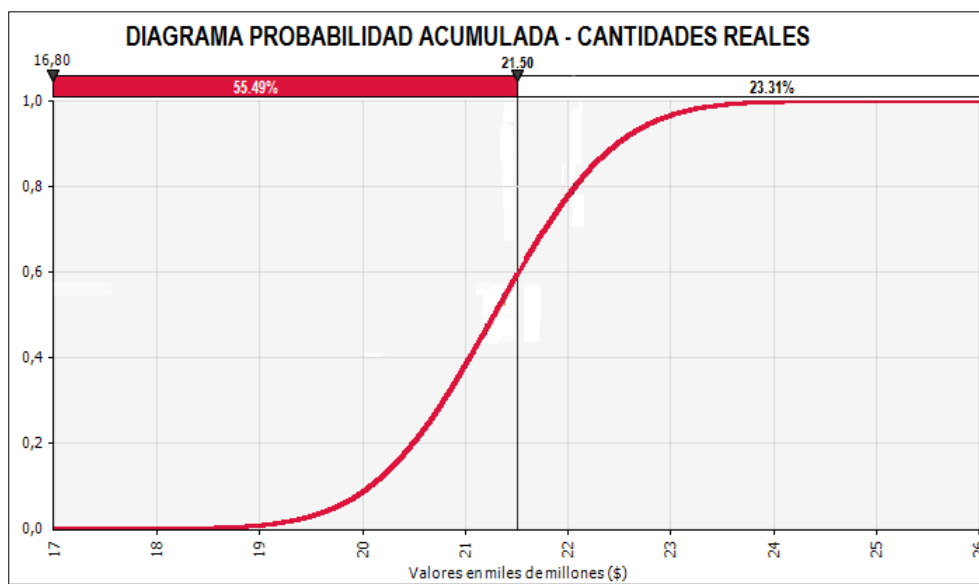


Figura 28 Diagrama de probabilidad acumulada. Cantidades reales de obra. @Risk 7.5.

El mismo análisis realizado anteriormente se aplica también para los costos directos del proyecto (figura 28). En este caso, la gráfica de distribución de probabilidad acumulada (figura 27), el costo directo inicial del proyecto \$16.154.871.479 tenía una probabilidad de ocurrencia del 0.6%, mientras el costo directo real del proyecto \$ 21.515.215.251 tenía una probabilidad de ocurrencia del 56,06%.

Parámetro	Valor	Probabilidad <=
Mínimo	\$17.008.256.214,00	0%
Mediana	\$21.286.521.489,00	52%
Máximo	\$25.153.584.684,00	100%
Moda	\$21.315.261.478,00	53%
Media	\$21.286.238.962,00	50%
# Iteraciones	100000	-
# Simulaciones	5	-

Tabla 11 Tendencia central de datos. Simulación duración cantidades ejecutadas.

De la simulación de costos, se puede concluir que su costo final con cantidades reales ejecutadas, tenían una mediana probabilidad de ocurrencia. El incremento en el costo de un proyecto, se puede deber a varios factores, como alza en el costo de los insumos, alza en la ejecución de actividades del proyecto o mayores cantidades de obra y nuevas actividades “no previstas” como en el caso del *proyecto tipo*. Sin embargo, la simulación de costos no permite conocer y responder preguntas como ¿Qué, quién y dónde están las causas del excedente en el presupuesto? O ¿Qué tan beneficioso fue para el contratista realizar actividades adicionales y mayores cantidades, excediendo el tiempo de entrega estimado? La evaluación con el método de valor ganado planteado en el capítulo 5.4.1, permite despejar todos estos interrogantes, relacionando trabajo efectivo, costos reales y costo presupuestado, evaluando el desempeño del proyecto en tiempo y costo.

8.4 EVALUACIÓN POR METODO VALOR GANADO

Adicionalmente a lo planteado en los objetivos de la presente investigación, fue necesario aplicar el método del valor ganado al *proyecto tipo*, para el seguimiento del desarrollo del proyecto tipo. La medición del valor ganado se realizó en cada hito histórico (ver tabla 7), a partir de la medición de las cantidades físicas ejecutadas y actividades finalizadas. Tal como se desarrolló en el marco teórico, el método del valor ganado compara el trabajo efectivo (Ev- Valor ganado) con el costo presupuestado (Pv- Valor planeado) y los costos reales de las actividades constructivas desarrolladas. El modelo del método del valor ganado se realizó en el programa Ms Project 2013, donde tiene como fundamento la evaluación de lo presupuestado (Pv- Valor planeado), determinada por el programa como la línea base, la cual determina si en las fechas de corte el proyecto se ejecutó de manera perfecta a lo ajustado inicialmente. Para realización del análisis de este capítulo se tomó dos fechas de interés (Hitos histórico- tabla 4) que son inicio programado del sector 3 y finalización de obra programada, sin embargo la evaluación del método del valor ganado se realizó para todos los hitos históricos (Ver anexo).

Evaluación método valor ganado	
Fecha	1/03/2012
Hito histórico	Inicio programado sector 3
PV	\$ 2.607.410.469,71
AC	\$ 3.900.808.363,76
EV	\$ 1.494.276.246,00
VC	-\$ 2.406.117,76
VP	-\$ 1.113.134.223,71
IRC	0,38
IRP	0,57

Tabla 12 Evaluación el método valor ganado. Inicio programado sector 3

La ejecución ideal de la obra es la línea base del programa (Costo y cantidades presupuestadas), la interpretación y el análisis de la tabla 9, es el siguiente:

- A la fecha se tenía un atraso de aproximadamente 48 días calendario, con respecto al programa de obra. Para la fecha según la programación de obra se tenía que tener un avance del 18% de la obra, sin embargo su progreso real era del 6.5%.
- El índice de desempeño del proyecto (IRP) era del 0.57, hasta la fecha el contratista había tenido un desempeño bajo, interpretándolo de una mejor manera el contratista por cada 10 días hábiles de trabajo estaba dejando de producir 4 de esos días. Sin duda alguna el desempeño del proyecto era bajo hasta la fecha, esto significaba que por cada 10 días de avance en tiempo, significaba un atraso real de 4 días al programa de obra establecido. No se puede establecer exactamente a que corresponde el bajo rendimiento del proyecto en fase de construcción, pero en el capítulo 7.3, se pudo establecer que las duraciones de las actividades constructivas estimadas tenían una muy baja probabilidad de ocurrencia, lo que da lugar a decir que se tenían rendimientos estimados de ejecución de ejecución muy altos, a lo que en realidad el contratista podía ejecutar.
- La varianza de costos entre valor adquirido y valor planeado (VP), correspondía al valor de \$ -1.113.134.223,71, es decir que para la fecha el contratista por tener un desempeño bajo en la ejecución del proyecto, había dejado de producir esa cierta cantidad de dinero.
- El índice de desempeño de costos (IRC) hasta la fecha es de 0.38, lo que quiere decir que por cada \$1 pesos invertido en el proyecto por parte del contratista, estaba retornando a él, \$0.38 pesos, lo que a la fecha estaba generando una pérdida de \$ 0.72 pesos, por cada pesos invertido.
- En este estado del proyecto era conveniente tomar acciones correctivas con el objetivo de aumentar el rendimiento del proyecto y disminuir las pérdidas que se tenían hasta la fecha.

Evaluación método valor ganado	
Fecha	13/11/2012
Hito histórico	Inicio programado sector 3
PV	\$ 21.130.565.995,28
AC	\$ 13.161.187.820,25

EV	\$ 7.120.886.504,52
VC	-\$ 6.792.656.200,32
VP	-\$ 6.075.042.291,09
IRC	0,56
IRP	0,56

Tabla 13 Evaluación el método valor ganado. Finalización programada de obra.

El análisis realizado anteriormente para la fecha de interés, se realiza también para la fecha de finalización programada del proyecto:

- A la fecha se tenía un atraso de aproximadamente 156 días calendario, correspondiente a un 37% de atraso con respecto al programa de obras.
- El índice de desempeño del programa de obra (IRP) continuó siendo casi constante a lo evaluado en la fecha anterior de análisis, el desempeño del proyecto continuo siendo bajo. Se debe considerar que las estimaciones de rendimiento de duración realizadas por la entidad contratante y contratista tenía una probabilidad muy baja de ocurrencia.
- El índice de desempeño de costos (IRC) a la fecha era del 0.56, lo cual dice que por cada \$ 1 pesos invertido al proyecto se ejecutaban \$ 0.56 pesos. Esta conclusión puede deberse a múltiples factores, como un alza de precios en el proyecto, un mal presupuesto de las actividades constructivas o un mal desempeño y ejecución del proyecto, como quedó evidenciado en los informes del contratista, donde se tomaron decisiones para acelerar el proyecto pero estas no fueron las correctas, se decidieron acelerar actividades constructivas que tenían un impacto muy bajo sobre la duración final del proyecto. Sin duda alguna un análisis de sensibilidad podría haber ayudado a una mejor toma de decisiones.

9 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En esta investigación se han aplicado herramientas de común uso en la industria de la construcción y otras que a pesar de su relevancia no son usadas por las empresas constructoras y entidades contratantes. Con la utilización de todas estas herramientas en conjunto, pudo visualizar que todavía existe una gran brecha entre los conceptos teóricos utilizados y lo realmente ejecutado, alrededor de los procedimientos de planeación de proyectos, programación y control de proyectos. La utilización de cada una de estas herramientas desarrolladas en la investigación, permitieron la visualización de mejores resultados posibles de alcanzar, con el objeto de obtener mejores resultados tanto en tiempo como en costo para los proyectos constructivas a realizar.

El proceso de recolección de datos de rendimientos y costos unitarios de diferentes proyectos de características similares realizados en el valle de cauca fue la base para el desarrollo de esta investigación. El esfuerzo realizado para la recopilación de datos permitió, visualizar la aplicación de herramientas que permitieran el proceso de toma de decisiones durante la planeación y programación de obras e implementar análisis como simulación Monte Carlo lo cual permite mejorar y acercar cada día más los proyectos constructivos a la verdadera realidad y complejidad

de la ejecución. Es recomendable que las entidades contratantes y contratistas generen una base de rendimientos y costos unitarios, con el objetivo de realizar estimaciones en duraciones y costos más cercanas a la realidad.

El método de la ruta crítica (CPM) es una técnica para la planeación y dirección de proyectos. La aplicación de este método permitió durante la etapa de planeación del proyecto tipo, la evaluación pronta y comparación con programa opcionales de trabajo. El diagrama de la ruta crítica permitió precisar los efectos de cada variación o retraso del programa de obra. Fue fundamental que el modelo de simulación de costos y duración de *proyecto tipo* tuviese como base la red CPM, lo que permitió la evaluación de las diferentes hipótesis al momento de toma de decisiones y crear indicadores que midieran el impacto de las actividades constructivas sobre la duración y costo final del proyecto.

Al realizar el análisis de riesgos con simulación Monte Carlo se tiene una serie de escenarios probables, en el cual por parte del contratista se debe asumir un riesgo entorno a la duración estimada del proyecto y evaluar los posibles impactos negativos que se puedan tener. En la presente investigación se concluye que los métodos de estimación de duración determinísticos utilizados actualmente no son suficientes para hacer una planificación más confiable, la estimación de duración de proyectos constructivos se realiza por medio de juicio directo, donde el tiempo asociado a la duración de la actividad corresponde a una estimación prevista de experiencias pasadas, provocando una gran diferencia entre la fecha de estimación y la fecha de terminación real de los proyectos constructivos.

Evaluar las condiciones iniciales de un proyecto antes de su ejecución, considerando realizar un análisis de riesgo y análisis de sensibilidad, podría aumentar la posibilidad de acercarse más a la ejecución real y aumentar las garantías de cumplimientos de objetivos planteados por la entidad contrate. De igual manera se recomienda a las entidades contantes implementar análisis de riesgos a la formulación de proyectos, con el objetivo de estimar duraciones y costos con una probabilidad alta de cumplimiento y cercanos a la realidad de ejecución. En la investigación, el caso de estudio antes de la ejecución tenía una probabilidad de ocurrencia del 1% de cumplimiento de la duración estimada. Se logró identificar por medio del análisis de sensibilidad antes de ejecución que las actividades constructivas más influyentes eran filtro en geodren, mezcla densa en caliente, transporte de materiales pétreos, esto debido a las grandes cantidades de obra a ejecutar y la configuración del diagrama de red CPM. Los problemas de ejecución de las actividades más influyentes identificadas por medio del análisis de sensibilidad, afectan directamente la duración total del proyecto, por lo que es necesario una atención especial durante la ejecución de estas actividades.

La evaluación de herramientas de análisis de riesgos en el caso de estudio sobre las cantidades realmente ejecutadas, muestran que era muy improbable que se cumpliera la fecha de terminación inicial (420 días). De igual manera al realizar la simulación en costos, la probabilidad de ocurrencia del costo inicial era muy baja cercana al 0.6 %, tanto la estimación de duración como de costos eran estimaciones de alto riesgo, con probabilidades muy bajas de que ocurriesen. A pesar que el

proyecto contó con una etapa de pre-construcción para recalcular las condiciones iniciales del proyecto, el contratista no pudo percibir sino hasta que se tuvo un avance considerable del proyecto, que los plazos estimados no se podían cumplir y los rendimientos reales de las actividades constructivas eran muy bajos, con respecto a lo representando en el cronograma de obras. Finalmente la ejecución del proyecto se llevó acabo con las condiciones iniciales de tiempo y alcance modificado entorno a las cantidades de obras y actividades adicionales, el contratista no solamente tuvo un retraso de 384 días calendario con respecto a la programación inicial, sino que utilizó mayor tiempo del realmente necesario para terminar el proyecto con su alcance actualizado, ocasionando todos los perjuicios en los objetivos del proyecto.

Como se expresó inicialmente, el uso del sistema de valor ganado no estaba contemplado en el alcance inicial de la investigación, fue necesario incluirla ya que esta es una herramienta que permite el control y seguimiento del proyecto, produciendo indicadores que permite evaluar la ejecución real. Uno de los errores comunes que se comente en el medio entorno al seguimiento de proyecto es compara los presupuestado con lo “gastado”, esta comparación no es muy acertada, el método de valor ganado compara trabajo efectivo con el costo presupuestado y los costos reales de las actividades constructivas desarrolladas. La evaluación del método del valor ganado muestra que según el índice de rendimiento de costos del proyecto tipo, por cada \$ 1 pesos invertido, genera una ganancia de \$ 0.56 pesos. De lo anterior se puede concluir que la entidad contratante a pesar de que tuvo una utilidad estimada de \$1.385.455.411,02 pesos, tuvo una pérdida de aproximadamente \$ 1.088.572.108,66 pesos por la mala ejecución del proyecto.

Los resultados obtenidos en esta investigación se pueden aplicar a cualquier proyecto constructivo durante el proceso de planeación y programación. La calidad y cantidad de datos recopilados en la presente investigación fueron importantes para demostrar la utilidad práctica de uso durante en el proceso de planeación y programación. Es importante que las empresas constructoras crean su propia base de rendimientos y costos unitarios para las diversas regiones y zonas del país donde realizan proyectos constructivos, ya que utilizando la misma metodología de la presente investigación se pueden realizar análisis preventivos de riesgos, planeación, programación y control de obras para cualquier proyecto constructivo.

10 ANEXOS

Para limitar el contenido del presente documento, algunos de los resultados de la presente investigación son proporcionados en medio digital

- ANEXO #1: Se encuentra todo lo relacionado con la recopilación de datos, desarrollo de red CPM, presupuestos de obras e informes de contratista.
- ANEXO #2: Contiene los modelos de simulación desarrollados y todos sus complementos.
- ANEXO #3: Contiene los resultados obtenidos de la presente investigación.

11 BIBLIOGRAFÍA

- Alba, J. (2014). Método del Valor Ganado. 1-3.
- Andrade, L. F. (2015). La Hora de la Infraestructura. *Revista Dinero*, 8-12.
- Arango, S. (2006). Aportes para el mejoramiento de la productiva en la construcción de edificaciones. Bogotá.
- Arrieta, S. (2015). Un balance agridulce. *Revista Dinero*, 70-74. Obtenido de Arrieta, S. (2015). Un balance agridulce. *Revista dinero*, *Revista semana*, 70.
- Barragan, J. L. (2015). Una Vía de Pelicula. *Revista Dinero*, 20-24.
- Barraza, G. A., Back, & W.E. and Mata. (2004). Probabilistic forecasting of project performance using stochastic S curve. *Journal of Construction Engineering and Management*, págs. 25-32. doi:10.1061/(ASCE)0733-9364(2004)130:1(25)
- Bazzani, C., & Carmen Lucia. (2007). *Modelo para evaluar riesgos en proyectos de inversión*. Pereira.
- Céspedes, J. D. (2010). Mejoramiento de la Productividad en Construcción: Time-Lapse y Simulación Digital como Herramientas de Análisis.
- Coss Bú, R. (2013). Simulación un enfoque practico. *Departamento de Ingenieria Industrial Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey*.
- DANE. (2013). *Indice de Costos de Construcción Pesada*. Bogotá D.C.
- Della, V. (2009). *Informe sobre la evaluación del sistema constructivo del tunel de ampliación Cachí*. Tunnelconsult.
- Faulín, J. (2014). Simulación Montecarlo con Excel.
- Fiorito, F. (2006). La simulación como una herramienta para el manejo de la incertidumbre. *Universidad del Cema*, 4-10.
- Flanagan, R., & Morgan, G. (2010). *Risk management and construction*. Oxford: Blackwell.
- Garcia, D. F. (2 de 10 de 2012). *El Espectador*. Obtenido de <http://www.elespectador.com/noticias/economia/colombia-se-rajainfraestructura-vial-articulo-388669>
- Gómez Cabrera, A., & Orozco Ovalle, A. R. (2010). Simulación digital como herramienta para la gestión del conocimiento en la construcción de edificaciones en concreto. Bogotá.

- Gomez Cabrera, A., Echeverry, J., Giraldo Palma, M. X., Otálora Sanchez, C., & Cano Morales, M. L. (2012). Mejoramiento de procesos constructivos a partir de un módulo programable para captura de imágenes y simulación digital. Bogotá.
- Gómez, H. D., & Orobio, A. (2015). Efectos de la Incertidumbre en la Programación de Construcción de Carreteras. *DYNA*, 8-10.
- Hertz, D. B., & Thomas, H. (1983). *Risk analysis and its application*. Nueva York: John Wiley e hijos.
- Instituto Nacional de Estadística y Censos. (2002). *Como Usar Un Índice de Precios*. Buenos Aires.
- Jegel, R. (2014). *Projectware*. Obtenido de <http://www.projectware.com.au/tutorials/Tu08.pdf>
- Kwak, Y. H. (2005). Exploring Monte Carlo Simulation. *Palgrave Macmillan*.
- Larrinaga, V., & Rodríguez, L. (2010). El estudio de casos como metodología de investigación. *Investigaciones Europeas de Dirección y Economía de la Empresa*, 31-52.
- Larson, E., & Gray, C. (2015). *Administración de proyectos 4 edición*. Bogotá: MC Graw Hill.
- Law, A. M. (2006). *Simulación Modeling and Analysis 4a ed*. New York, Usa: Mc Graw Hill.
- Martín Martín, Q. (2008). *Tratamiento estadísticos de datos con SPSS*. España: Thomson Editore Spain.
- Meredith, J. R., & Mantel, S. J. (2009). *Project Management: A Managerial Approach 7a ed*. John Wiley.
- Mincomercio. (11 de 10 de 2013). *mincit*. Obtenido de <http://www.mincit.gov.co/tlc/publicaciones.php?id=12913>.
- Olsen, T., & Osmundsen, P. (2005). Sharing of endogenous risk in. *Journal of Economic Behavior & Organization*, págs. 511-526. doi:10.1016/J.JEBO.2003.09.019
- Paez, H. (2007). Simulación digital para el mejoramiento de la planeación de procesos constructivos. Bogotá.
- Palisade. (2014). *palisade-ita*. Obtenido de http://www.palisade-ita/analiis_sensibilidad
- Palisade Corporation. (2013). *Risk Analysis and Simulation Add-In for Microsoft® Excel*. Ithaca, NY USA.
- Project Management Institute, Inc. (2000). *Project Management Body Of Knowledge*. Pennsylvania, Usa.

- Rodriguez Fernández, M. (2007). La problemática del riesgo en los proyectos de infraestructura y en los contratos internacionales de construcción. *Mercatoria*, 1-2.
- Santos, J. N. (2008). *Programación y Control De Proyectos y Obras*. Bogota D.C.
- Taha, H. A. (2006). *Operations Research an Introduction*. New Jersey, USA: Prentice Hall.
- Tiempo. (2012). *El Tiempo*. Obtenido de <http://www.eltiempo.com/archivo/documento/CMS-12160371>
- Vallverdu, A. (2012). Pavimentos en infraestructura vial. *EMB Construcción*, 10-13.
- Vanguardia. (19 de 08 de 2013). *europapress*. Obtenido de <http://www.europapress.es/economia/noticia-espana-paga-construir-carreterascasi-doble-alemania-tribunal-cuentas-europeo->
- Woodhead, A. (2002). *Método de la ruta crítica y sus aplicaciones a la construcción*. Noriega Editores.
- Yopez, T. (2013). Infraestructura de Transporte en Colombia. *Fedesarrollo*.
- Yin. (1989). Selección caso de estudio.