

ESTIMACIÓN DE CONTINGENCIA EN COSTOS PARA PROYECTOS DE CONSTRUCCIÓN DE
INFRAESTRUCTURA VIAL EN EL SUR OCCIDENTE COLOMBIANO

ANDRES FERNANDO MUÑOZ VALENCIA

Nota de Aceptación

Certificamos que el presente Trabajo de
Grado Satisface, en alcances y calidad,
todos los requisitos Que demanda un
Trabajo de Grado de Maestría.



ARMANDO OROBIO QUINONES
Director



IVÁN FERNANDO OTÁLVARO CALLE
Jurado



JAVIER ALEXANDER PEREZ CAICÉDO
Jurado

Aprobado en cumplimiento de los requisitos
exigidos por la Pontificia Universidad Javeriana
Cali, para optar el título de Magister en
Ingeniería Civil.



HERNÁN CAMILO ROCHA NIÑO Ph. D.
Decano Facultad de Ingeniería y Ciencias



JUAN CARLOS MARTÍNEZ ARIAS
Director Posgrados de Ingeniería y Ciencias

Santiago de Cali, 19 de Enero de 2021

Acta de Correcciones al Documento de Trabajo de Grado

Santiago de Cali, 19 de enero de 2021

Autor: Andres Fernando Muñoz Valencia

Título del Trabajo de Grado: “Estimación de contingencia en costos para proyectos de construcción de infraestructura vial en el sur occidente colombiano”

Director: Armando Orobio Quiñones

Como indica el artículo 2.13 de las Directrices para Trabajo de Grado de Maestría, he verificado que el estudiante indicado arriba ha implementado todas las correcciones que los Jurados del Proyecto de Trabajo de Grado definieron que se efectuaran, como consta en el Acta de Evaluación correspondiente.



Firma del Director del Trabajo de Grado



Pontificia Universidad
JAVERIANA
Cali

Maestría en Ingeniería
Facultad de Ingeniería y Ciencias

DATOS DEL ESTUDIANTE

NOMBRE: Andres Fernando Muñoz Valencia
DIRECCION: Carrera 112 # 48-92 (Apartamento 605, Torre 1)
TELEFONO: 316 327 5666
CORREO ELECTRÓNICO: Andrew2563@hotmail.com
PROFESION: Ingeniero Civil
UNIVERSIDAD: Universidad del Valle
EMPRESA: Constructora Solanillas S.A.
CARGO: Residente administrativo y de control presupuestal



RESUMEN

El análisis de riesgos cada día está tomando más importancia a nivel mundial, en los proyectos de construcción se ha convertido en parte fundamental ya que permite analizar posibles inconvenientes con suma antelación, estar preparados y tener un plan de contingencia según el riesgo que se presente, una de las contingencias más importantes es la contingencia en costos, por ello en distintos países alrededor del mundo han buscado diferentes maneras para estimar la contingencia de costos de proyectos de construcción. Debido a esto y la ausencia de una metodología para calcular la contingencia de costos para proyectos de infraestructura vial en Colombia, se identifica la necesidad de desarrollar una propuesta metodológica que permita estimar esta contingencia en los proyectos de infraestructura vial para el sur occidente colombiano. Esta propuesta se basó en información de proyectos de infraestructura vial en el sur occidente colombiano, se desarrollaron modelos probabilísticos con la simulación Monte Carlo, una vez los modelos fueron validados se describió la metodología a seguir para determinar cuál debe ser el porcentaje de contingencia de costos para el proyecto que el usuario de la metodología desee, finalmente para facilitar la implementación de la metodología desarrollada codifica un software en el que el usuario puede ingresar la información de su proyecto y obtener resultados de manera ágil.



ABSTRACT

The risk analysis is becoming more important worldwide every day, in construction projects it has become a fundamental part since it allows analyzing possible inconveniences well in advance, being prepared and having a contingency plan according to the risk that arises, One of the most important contingencies is the contingency in costs, for that reason in different countries around the world they have looked for different ways to estimate the contingency of costs of construction projects. Due to this and the absence of a methodology to calculate the contingency of costs for road infrastructure projects in Colombia, the need to develop a methodological proposal that allows estimating this contingency in road infrastructure projects for the south west of Colombia is identified. This proposal was based on information from road infrastructure projects in the south west of Colombia, probabilistic models were developed with the Monte Carlo simulation, once the models were validated, the methodology to follow was described to determine what the percentage of cost contingency should be for the project that the user of the methodology wishes, finally, to facilitate the implementation of the developed methodology, it codes a software in which the user can enter the information of their project and obtain results in an agile way.



Pontificia Universidad
JAVERIANA
Cali

**ESTIMACIÓN DE CONTINGENCIA EN COSTOS PARA PROYECTOS DE
CONSTRUCCIÓN DE INFRAESTRUCTURA VIAL EN EL SUR OCCIDENTE
COLOMBIANO**

Programa de Maestría en Ingeniería Civil

Presentado por:

Ing. Andres Fernando Muñoz Valencia

Director:

Armando Orobio Quiñones PhD

Pontificia Universidad Javeriana Cali

Facultad de Ingeniería y Ciencias

Octubre de 2020

AGRADECIMIENTOS

A DIOS quien me guía día a día en cada paso de mi vida.

A mi madre Ximena y a mi abuela Consuelo por formarme como ser humano, por apoyarme y alentarme a alcanzar cada sueño y meta que he tenido.

A mi hermana Diana por su valioso apoyo, por su compañía, por escucharme cada que lo necesito y por ser mi colega incondicional.

A mi esposa Paola por ese amor del bueno, por la dedicación, la comprensión, por siempre alentarme a superarme en todos los aspectos de la vida y por estar en esos momentos difíciles.

A mi tío Mario, a mi tío Alberto y a mi primo Carlos por el valioso apoyo brindado en cada proyecto de mi vida.

Al ingeniero Armando Orobio por su guía, su tutoría, sus consejos, su paciencia y su tiempo.

A la ingeniera Ximena Solanilla, al Dr. Andres Gonzalez, al ingeniero Juan Pablo Gonzalez y al Ingeniero Jose Luis Duque por creer en mis capacidades, brindarme las herramientas y darme la oportunidad de cumplir un sueño y una meta en mi vida.

A la ingeniera Gabby Riera encargada de ventas en Latinoamérica de Palisade y a Palisade por su valiosa gestión en la consecución a costo cero, de la licencia de Decisions Tools para desarrollar mi trabajo de grado.

A los profesores de la Pontificia Universidad Javeriana Cali y especialmente al profesor Manuel Alejandro Rojas por el conocimiento transmitido en este proceso de aprendizaje.

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	6
1.1. Definición del problema	7
1.2. Justificación	9
1.3. Objetivos.....	11
1.3.1. Objetivo general	11
1.3.2. Objetivos específicos.....	11
1.4. Organización del documento	12
2. MARCO DE REFERENCIA	13
2.1. Revisión bibliográfica.....	13
2.2. Estado del arte.....	15
2.3. Marco teórico	15
3. METODOLOGÍA	23
3.1. Muestreo de los proyectos de infraestructura vial en el sur occidente colombiano	23
3.2. Desarrollo del modelo probabilístico con datos históricos del sector.....	26
4. METODOLOGIA PROPUESTA	35
5. PROPUESTA DE SOFTWARE	36
6. RESULTADOS Y ANALISIS.....	39
7. CONCLUSIONES Y SUGERENCIAS PARA FUTUROS TRABAJOS DE GRADO	42
8. ANEXOS.....	44
8.1. Presupuestos usados para desarrollar el modelo probabilístico.....	44
8.2. Datos curva de probabilidad acumulada.....	45
8.3. Software	46
9. REFERENCIAS BLIBLIOGRAFICAS	47

Lista de figuras

Figura 1. Desglose del problema	7
Figura 2. Ejemplo de muestreo Monte Carlo.....	18
Figura 3. Avance de simulación de Monte Carlos para un ítem de la tabla 2	27
Figura 4. Lista de jerarquización producto del comando ajuste de @Risk	28
Figura 5. Ajuste de distribución de probabilidad seleccionada a muestre Monte Carlo	28
Figura 6. Curva de distribución de probabilidad acumulada escenario 1	30
Figura 7. Curva de distribución de probabilidad acumulada escenario 2	31
Figura 8. Curva de distribución de probabilidad acumulada escenario 3	31
Figura 9. Ajuste de regresión lineal no paramétrica usando Fourier en Curve Fitting Tool de Matlab	33
Figura 10. Imagen de ilustración sobre el desarrollo de Cost-Reserve en la interfaz gráfica	36
Figura 11. Imagen de ilustración sobre el desarrollo de Cost-Reserve en el cálculo interno.	37
Figura 12. Imagen de bienvenida a Cost-Reserve	38
Figura 13. Valor esperado según datos de simulación Monte Carlo y valor calculado con ecuación obtenida de la regresión lineal no paramétrica usando Fourier ítem 1 de la tabla 2.....	39

Lista de tablas

Tabla 1. Actividades de mayor importancia económica en proyectos de infraestructura vial de primer orden.....	23
Tabla 2. Información básica presupuestos utilizados para la base de datos	24
Tabla 3. Cantidad, costo inicial y costo final por ítem para cada presupuesto	25
Tabla 4. Índice de costos de construcción pesada	25
Tabla 5. Segmento de base de datos con información del análisis exploratorio	26
Tabla 6. Resultado numérico tres escenarios de selección de funciones para el ajuste en @Risk	30
Tabla 7. Limitaciones a los valores unitarios del presupuesto a evaluar	34
Tabla 8. Valor esperado según datos de simulación Monte Carlo y valor calculado con ecuación obtenida de la regresión lineal no paramétrica usando Fourier para los items de la tabla 2.	40
Tabla 9. Verificación Cost-Reserve.....	41

1. INTRODUCCIÓN

Las carreteras, los caminos y en general la infraestructura vial en la antigüedad eran de vital importancia para el desarrollo de un imperio, de una ciudad o de una nación, le permitieron a la antigua roma la conquista de vastos territorios al poder movilizar batallones con una rapidez jamás antes vista, permitían el comercio y la diseminación de la cultura romana a la misma velocidad que lo hacían sus tropas. En la actualidad la infraestructura vial para una ciudad o nación tiene mayor importancia que en la antigüedad, ya que no solo permite el transporte personas sino de mercancía y esto a su vez mueve la economía de una nación. En el caso de Colombia, Según De la Cruz et al., (2018) en la publicación realizada para el Banco Interamericano de Desarrollo (BID) debido al atraso que presenta en su infraestructura vial se convierte en una limitante para lograr el crecimiento pertinente en el desarrollo de diversas actividades económicas, teniendo en cuenta la importancia de contar con vías aptas para el crecimiento de la nación, según la Bitácora de la infraestructura de la Camara Colombiana de la Infraestructura, (2019), año tras año se realiza una importante inversión en la construcción, mejoramiento o rehabilitación de las mismas, sin embargo al igual que en otras áreas del sector de la construcción en el país se presentan sobre costos en la ejecución de las actividades o mayores costos de obra por adición de actividades o mayores cantidades de obra necesarias para culminación del proyecto.

A nivel mundial se están desarrollando investigaciones tales como las de Eldosouky et al. (2014), Bakhshi & Touran (2014), Shrestha & Shrestha (2016) y Gómez & Orobio (2015) con el fin de tratar de predecir con alto grado de confiabilidad cuáles serán los posibles atrasos y sobre costos de proyectos de construcción, a fin de programar las debidas contingencias durante la etapa de planeación. La mayoría de estas investigaciones se enfocan proyectos de edificaciones, pero pocos se enfocan al área de infraestructura vial, siendo un área de gran inversión.

Contar con una herramienta metodológica que permita estimar contingencias en costos durante la etapa de planeación, sería una gran ventaja para los responsables de la gestión de los proyectos viales en el país, en consecuencia, el objetivo de esta investigación se centra en proponer una metodología para estimar contingencias en costos de proyectos de infraestructura vial. En el desarrollo de la investigación se analizará información histórica del sector, se desarrollarán modelos y simulaciones probabilísticas para analizar las variaciones de costo de los proyectos construcción de infraestructura vial, para finalmente proponer una metodología que permita

estimar la contingencia de costos para proyectos de construcción de infraestructura vial en el sur occidente colombiano con alto nivel de confianza.

1.1. Definición del problema

A continuación, se presenta la definición del problema de investigación, seguido por la pregunta y finalmente el alcance.

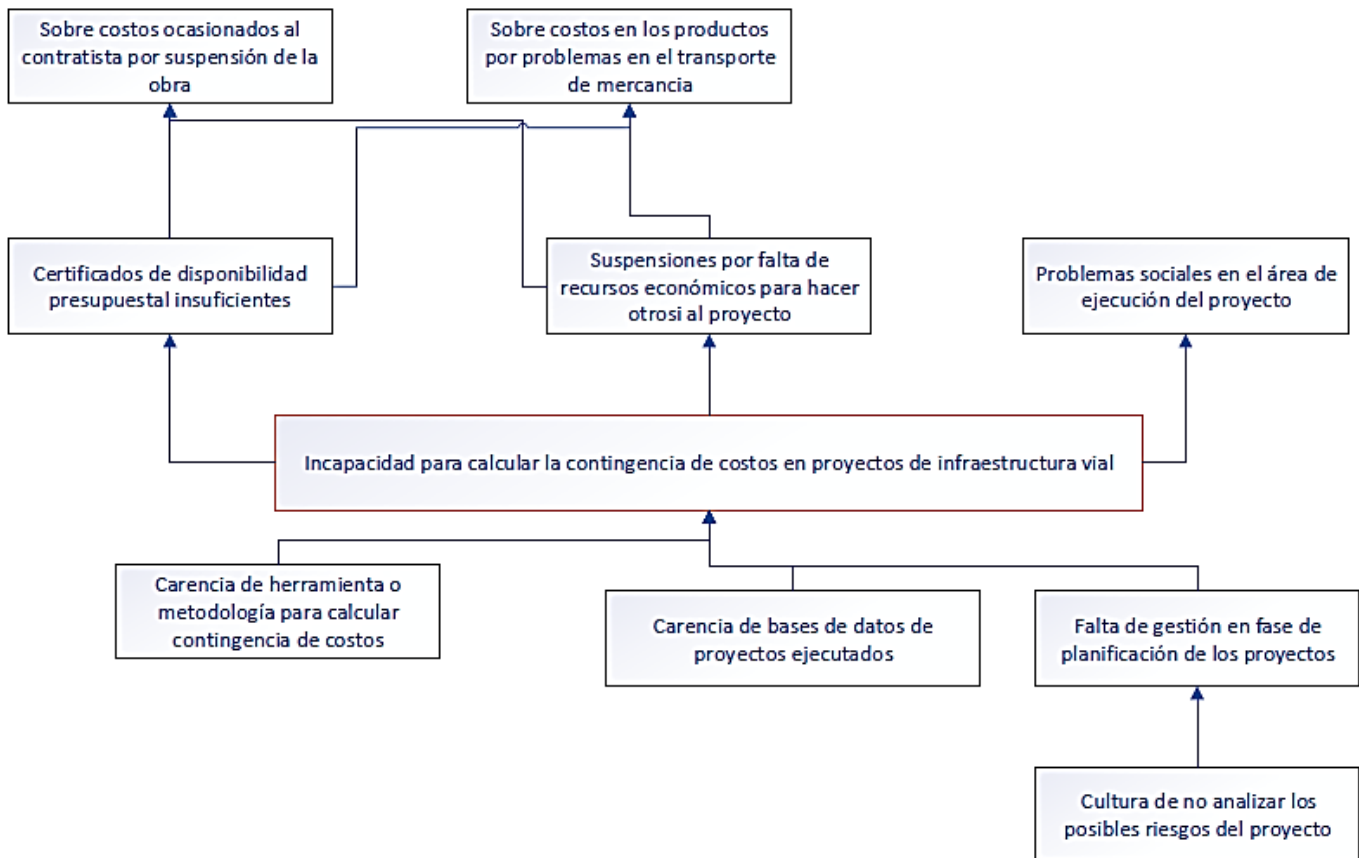


Figura 1. Desglose del problema

En obras de infraestructura vial se presenta una carencia evidente de una herramienta o metodología que permita calcular la contingencia de costos para los proyectos con cierto grado de confiabilidad tal como lo enuncian Stephen & David Picken (2000), Nassar (2002) y Odeck (2004), así mismo no se cuenta con una base de datos compilada de los costos reales de los proyectos de este tipo y a esto se le debe sumar que en el sector no es común la práctica de analizar los riesgos que tendrán los proyectos, a pesar de que los proyectos en su fase de planificación tienen identificada claramente la ruta crítica esto permite determinar las duraciones de proyectos

y a su vez identificar las contingencias en tiempo, sin embargo la contingencia en costos depende finalmente de cuáles son los costos finales de cada actividad después de su ejecución, a su vez esto lo que implica una debilidad en la gestión de los proyectos en la fase de planificación.

Al ser obra pública, los fondos de un proyecto están condicionados a los certificados de disponibilidad presupuestal que tenga la entidad estatal que está realizando la contratación, por lo que en la mayoría de los casos se dificulta realizar otrosí por mayor valor a los contratos y las obras corren riesgo de suspensión temporal hasta la consecución de los recursos. En algunos casos se requieren suspensiones que pueden ir desde meses, hasta años, dependiendo de la celeridad que se le pueda dar al proceso que finalice en la aprobación de nuevos recursos. En ocasiones se deriva una reclamación legal entre contratista y entidad contratante, dejando la ejecución del proyecto en un limbo jurídico.

Los costos ocasionados a la nación por estas suspensiones son incalculables ya que los transportes de mercancía se ven fuertemente afectados, los costos ocasionados al contratista en algunos casos son tan altos que generan pérdidas para las empresas que ejecutaron el proyecto, a su vez esto genera despidos parciales o totales en caso de que alguna de las empresas termine en quiebra, el impacto social causado por la suspensión de la obra es directamente proporcional a la magnitud de la misma.

Por lo anterior se presenta la necesidad de desarrollar una metodología que permita estimar la contingencia en costos que tendrán los proyectos de infraestructura vial, a fin de definir reservas presupuestales, para asegurar la terminación adecuada de las obras y con esto disminuir al máximo las consecuencias producto de la carencia de una metodología para el cálculo de la contingencia de costos en este tipo de proyectos. El presente estudio se centra en el análisis de proyectos en el sur occidente colombiano a partir de datos de contratación históricos del SECOP I.

El presente trabajo de grado consistió inicialmente en realizar una revisión bibliográfica sobre metodologías aplicables a la estimación de contingencias en costo de proyectos de construcción, se analizará y seleccionara información histórica de proyectos culminados de infraestructura vial en los departamentos de Caldas, Cauca, Huila, Nariño, Quindío, Risaralda, Tolima y Valle del Cauca en un periodo comprendido entre 2014 y 2019, con esta información se creara un modelo probabilístico que represente el comportamiento de los datos muestreados utilizando métodos estadísticos y que permita determinar cuál debe ser el valor para la contingencia

de costos en estos proyectos, se validara el modelo probabilístico, una vez el mismo este validado se desarrollara la metodología que permita estimar la contingencia de costos en proyectos de infraestructura vial de primer orden en el sur occidente colombiano.

1.2. Justificación

La infraestructura vial en Colombia, según las cifras que se muestran a continuación es parte fundamental para el desarrollo de la nación ya que está directamente relacionada con todos los sectores productivos del país.

Según el informe anual del Ministerio de Transporte, (2018), las obras civiles de infraestructura vial corresponden al 1,92% del PIB, lo que equivale a 18 billones de pesos aproximadamente, el 69% de la inversión pública en el sector de transporte se realizó en el sector carretero, el restante en sector ferroviario, aéreo y marítimo. El estado de la red primaria de carreteras pavimentadas no concesionada a cargo del Instituto Nacional de Vías INVIAS, (2019) (6.033,6 km), es que el 13,53% se encuentra en muy buen estado, el 33,61% en buen estado, el 34,00% en regular estado y el 18,86% entre mal y muy mal estado. Respecto al transporte de pasajeros nacionales el 83,42% se desplazaron por transporte terrestre, en cuanto al transporte de carga, el 80,98% se realizó por vía terrestre.

En el reporte de la Bitácora de la infraestructura de la Camara Colombiana de la Infraestructura, (2019), se observa que a mayo de 2019 la totalidad de la red vial en el país era 205.937 km, compuesta por 18.516 km de red primaria, 45.137 km de red secundaria y 142.284 km de red terciaria, de la red vial pavimentada (6.845 km), el 22,3% se encuentra en muy buen estado, el 34,1% en buen estado, el 28,5% en regular estado, el 14,6% en mal estado y el 0,5% en mal estado. Con esta información se evidencia que como mínimo se requiere la intervención inmediata de aproximadamente 1.020 km de vías que se encuentran en mal estado.

En cuanto a las vías de cuarta generación se refiere, Bitácora de la infraestructura de la Camara Colombiana de la Infraestructura, (2019) expone que se realizara la construcción de 5.058 km de vías con una inversión pública de 35,8 billones de pesos y una inversión privada de 27,2 billones de pesos.

Según De la Cruz et al., (2018) en la publicación realizada para el Banco Interamericano de Desarrollo (BID), el país cuenta con 206.700 km de vías y se aumentaría la cifra en 8.000 km más

cuando se culmine la ejecución de los proyectos de vías de cuarta generación, sin embargo el BID considera que el país requiere de 45.000 kms más de vías para poder aumentar la productividad y tener crecimiento económico. Así mismo De la Cruz et al., (2018) indica que la densidad vial de Brasil es de 1.066 kms por millón de habitantes, de México es de 1.188 km por millón de habitantes, pero en Colombia es tan solo de 530 kms por millón de habitantes, las precarias condiciones de conectividad entre ciudades ocasionan que los costos de transporte interno y de exportación dupliquen el promedio de la región.

El informe del tercer trimestre del Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE) (2019), indica que los pagos correspondientes a la construcción de carreteras, calles, caminos, puentes, carreteras sobreelevadas, túneles y construcción de subterráneos, aumentaron 13,3% con respecto al mismo trimestre del año anterior, así mismo, el índice es el más alto en los últimos 5 años.

Con vistas al futuro de la inversión del país para el actual mandatario, según el plan nacional de desarrollo, entre el 2019 y el 2022 se invertirán 44,6 billones de pesos a proyectos de descentralización y conexión de territorios.

Cantarelli et al. (2012), realizaron una revisión literaria de libros y artículos relacionados con transporte e infraestructura vial a nivel mundial, en la información que recopilaron Flyvbjerg et al. (2003), se puede observar que en una revisión de 167 proyectos a nivel mundial, el 86% de los proyectos de infraestructura vial presentaron sobre costos. En la información que recopilaron Cantarelli et al. (2012) se puede observar que, en una revisión de 49 proyectos realizados en Estados Unidos, el 26% presentaron sobre costos.

Según el Informe de gastos gubernamentales del SECOP I 2011-2019 presentado por Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (2020), en el periodo de 2011 a 2019, por licitación pública se llevaron a cabo 2.169 contratos de infraestructura vial en el territorio nacional, esto incluye todas las dependencias gubernamentales, tales como alcaldías, departamentos, Instituto Nacional de Vías (INVIAS), Agencia Nacional de Infraestructura (ANI) y otros, el valor de los contratos realizados en este periodo de tiempo fueron por un valor total de 10,61 Billones de pesos, en este periodo de tiempo, 491 contratos sufrieron adendas por valor, o sea cerca al 22,64% de los contratos de infraestructura vial en el país. El valor que se ejecutó en los 491 contratos que tuvieron aumento presupuestal fue cerca de 3,52 billones de pesos, el

aumento de valor en estos contratos fue por 558.000 millones de pesos o sea cerca del 15,86% de incremento.

Según el párrafo del artículo 40 de la ley 80 de 1993 los contratos con entidades públicas no pueden tener adiciones presupuestales superiores al 50% de su valor inicial, en el caso de adiciones en tiempo no hay límite aunque deben estar correctamente justificadas para que sean aprobadas por la entidad, en el país solo los proyectos de gran envergadura cuentan con estudios preliminares que permitan tener presupuestos más acertados a la realidad, los demás proyectos no cuentan con estos estudios por lo que cuando los adicionales en presupuesto superan el 50% se debe tomar la determinación de reducir el alcance de las obras, esta reducción de alcance se realiza disminuyendo el kilometraje a intervenir o suprimiendo ítems de los contratos como obras de drenaje, contención o señalización.

Si con antelación la entidad estatal tuviera una metodología que le permitiera incluir en el presupuesto un valor destinado a la contingencia de costos que se presentan producto de no tener estudios previos se podrían disminuir los retrasos en la ejecución de los proyectos, reducir el número de proyectos que reducen el alcance de ejecución, los impactos sociales y productivos del país se disminuirían, el resultado de este trabajo busca dar solución a esta evidente necesidad.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Proponer una metodología para estimar la contingencia en costos de proyectos de infraestructura vial de primer orden en el sur occidente colombiano.

1.3.2. Objetivos específicos

El objetivo general se pretende alcanzar cuando se desarrollen los siguientes objetivos específicos:

- Construir una base de datos con proyectos de construcción de infraestructura vial en el sur occidente colombiano
- Desarrollar un modelo probabilístico a partir de los datos históricos para realizar la simulación y generalizar comportamientos en términos de costos a partir del análisis de los resultados de la simulación con la información de los proyectos recopilados.
- Realizar el análisis probabilístico, definir y describir la metodología resultado.

1.4. Organización del documento

En el capítulo 1 se realiza una introducción al problema de investigación, la justificación del mismo y los objetivos que se pretenden alcanzar con el desarrollo del trabajo de grado.

En el capítulo 2 se encuentra la revisión bibliográfica realizada acerca del tema de investigación y las definiciones teóricas sobre los diferentes métodos que serán utilizados para solucionar el problema de investigación.

En el capítulo 3 se describe la metodología implementada para el muestreo y desarrollo del modelo probabilístico.

Seguidamente en el capítulo 4 se describe la metodología producto de la investigación.

En el capítulo 5 se detalla como se realiza la programación del software desarrollado para la implementación de la metodología del capítulo 4.

En el capítulo 6 se presentan los resultados de la investigación y el análisis de los mismos.

En el capítulo 7 se presentan las conclusiones y sugerencias para futuros trabajos de grado

En el capítulo 8 se enumeran los anexos del trabajo de grado.

Finalmente, en el capítulo 9 se presentan las referencias bibliográficas en las cuales se apoyó la investigación del presente trabajo.

2. MARCO DE REFERENCIA

2.1. Revisión bibliográfica

Stephen & David Picken (2000), Anotan que en 1993 el gobierno de Hong Kong tomo la decisión de implementar una técnica denominada Estimación usando análisis de riesgos (ERA), con la finalidad de determinar de manera más concreta cual debería ser el valor de contingencia de costos para proyectos de construcción públicos, en el artículo se realiza un comparativo entre 287 proyectos que no usaron ERA y 47 que usaron ERA, se observa que la técnica tiene un uso exitoso a pesar de no estar totalmente optimizada, para implementar la técnica se toma cada costo por separado y se evalúa el posible riesgo que puede tener esa actividad, con esto se le asigna un valor posible para la contingencia de costo, el riesgo debe ser ajustado en el transcurso del proyecto según el desarrollo del mismo.

Nassar (2002), menciona que los contratistas con frecuencia incluyen un porcentaje para contingencia de costos basándose en la experiencia, en este artículo se realiza la explicación de un enfoque cuantitativo paso a paso para estimar la contingencia de costos para proyectos de construcción utilizando hojas de cálculo, se utiliza una distribución tipo PERT y usando estadística se determina la posibilidad de excedencia del costo base, se realiza un estudio de caso del enfoque cuantitativo explicado.

Eldosouky et al. (2014), al realizar un análisis con una simulación de Monte Carlo para obtener una distribución de probabilidad y así mismo hallar todos los posibles costos del proyecto, con esto determinar y hacer seguimiento al presupuesto para contingencia de costos en proyectos de licitaciones en Egipto, los autores analizan como la gestión de valor ganado tiene relación directa con el control del presupuesto para contingencia de costos, se validan los análisis teóricos analizando un proyecto real.

Odeck (2004), investigo la relación estadística entre los costos estimados y los costos reales de proyectos de construcción de infraestructura vial realizados en noruega en el periodo comprendido entre 1992 y 1995, del estudio concluyo que los proyectos presentaron un incremento aproximado de 7,9%, que los proyectos pequeños presentaban los mayores sobre costos en comparación a los proyectos grandes, que no influyo la mano de obra o la región en que se realizaron y que uno de los factores determinantes era la duración del proyecto, adicionalmente presenta 4 problemas políticos que a su consideración también influyeron en los sobrecostos.

Bakhshi & Touran (2014), estudiaron como los propietarios de proyectos de construcción agregan un monto de reserva a los proyectos de construcción como monto de contingencia ante posibles riesgos, existen diferentes maneras de determinar el monto que se debe asignar, en el artículo se recopilan casi todos los métodos existentes y se divide en tres grandes categorías, métodos determinísticos, métodos probabilísticos y métodos matemáticos modernos, se realiza la discusión en detalle de cada una de estas grandes categorías y las sub categorías que las componen.

Shrestha & Shrestha (2016), realizaron una revisión de literatura en la que encontraron que la mayoría de contratistas no tenía un método definido para determinar la contingencia de costos, solo se limitaban a poner un porcentaje del valor base, el propósito del fondo de contingencia es cubrir las ordenes de trabajo derivadas de mayores cantidades de obra, errores de diseño o aumento en el alcance del proyecto, los autores desarrollaron una red neuronal artificial utilizando 614 contratos de mantenimiento de vías rurales de Kenia, el porcentaje de contingencia se estimó teniendo en cuenta parámetros de entrada como categoría de trabajo, tipo de superficie de carretera, condición de la carretera, accesibilidad, condición del clima, ubicación y costo total de la actividad.

Hartman (2000), efectúa una comparación entre los resultados predictivos obtenidos al utilizar redes neuronales artificiales y al utilizar regresión lineal múltiple para la evaluación del riesgo y la estimación de contingencias, después de realizar este análisis comparativo, concluye que son más cercanos los resultados obtenidos con el método de redes neuronales artificiales según la realidad de cada proyecto, posteriormente presenta una evaluación sobre cómo se debe realizar la implementación de un sistema para contingencia de riesgos.

Gómez & Orobio (2015), realizaron un análisis de los factores determinantes en las demoras y sobre costos que se presentan en los proyectos de construcción de infraestructura vial, tuvieron en cuenta duraciones, costos reales, bitácoras de obra, actas de liquidación y memorias de actas de pago, para el análisis tomaron las actividades más representativas de un proyecto de estudio y otros 40 proyectos de la región del Valle del Cauca – Colombia, utilizando la simulación Monte Carlo consideraron diferentes escenarios para el tiempo de ejecución del proyecto de estudio, así mismo para los costos directos y los costos totales del mismo. Concluyeron que, para el proyecto analizado, la programación inicial tenía muy bajas probabilidades de ser cumplido, los problemas con la ejecución de las actividades de base granular, carpeta asfáltica, cajeo y cunetas en concreto ocasionan las variaciones más representativas en la duración total del proyecto.

Respecto a las variaciones en costo, se identificó que las actividades que ocasionan las variaciones más representativas son la carpeta asfáltica, la base granular y la sub-base.

2.2. Estado del arte

Todos los proyectos que se realicen en las diferentes áreas de conocimiento tienen implícitos diferentes tipos de riesgos, estos varían según el área del conocimiento, según la complejidad del proyecto, según el tamaño del proyecto y otras características. En los proyectos de construcción hay un sinnúmero de variables que pueden alterar la correcta ejecución del mismo, uno de los factores más importantes es el económico, en el mundo, los propietarios de proyectos asignan un porcentaje del costo base para cubrir contingencias presupuestales durante la etapa de diseño, a este porcentaje se le denomina contingencia en costos y en Colombia en promedio es el 10%, el dinero destinado con este fin es utilizado para cubrir cualquier actividad o costo adicional que no haya podido ser previsto en el presupuesto inicial, los contratistas a su vez incluyen un porcentaje para contingencias en su propuesta. El valor asignado por ambos interesados según Shrestha & Shrestha (2016), es un porcentaje que varía entre el 10% y el 15% del costo base del proyecto, sin embargo, ninguna de las dos partes conoce claramente como determinar este costo. El valor de la contingencia de costos es para utilizarla en la fase de construcción y mantenimiento del proyecto, la mayoría de veces esta se utiliza en la etapa de construcción ya que se presentan errores de diseño, ejecución de actividades no contempladas o mayores cantidades de obra. En Colombia, los proyectos públicos no consideran tener un fondo para contingencia de costo por ningún método de los existentes, solamente se rigen a la ley que indica que solo se puede realizar adiciones presupuestales por montos inferiores al 50% del valor inicial, en Colombia se requiere una metodología que permita determinar la contingencia de costos en proyectos de infraestructura vial utilizando muestreo de proyectos ya ejecutados y distribución de probabilidad.

2.3. Marco teórico

2.3.1. Marco teórico muestreo

El muestreo según Scheaffer et al. (2011) es una herramienta de la investigación científica que tiene como propósito determinar que parte o conjunto de elementos de un conglomerado de estos debe examinarse para inferir resultados veraces sin necesidad de estudiar el conjunto en su totalidad.

Muestreo de Monte Carlo:

El muestreo de Monte Carlo es un tipo de muestreo no determinista aleatorio que consiste en generar una muestra con base en una variable aleatoria tomando elementos al azar con base en la probabilidad acumulada de la variable seleccionada, las variables pueden generar diferentes probabilidades según sea el tipo de distribución de probabilidad escogida para describir la incertidumbre de dichas variables, sin embargo las muestras siempre tendrán mayor probabilidad de ocurrencia en las zonas de la distribución que tienen mayor probabilidad. Con estos elementos se conforma la muestra que se utilizara para realizar el modelo, para obtener una correcta representatividad de la función de distribución de la variable se debe tomar un alto número de muestras llegando a requerir usualmente miles o cientos de miles de muestras, es por este motivo que existen herramientas computacionales que permiten realizar muestreos con grandes cantidades de datos en intervalos de tiempo de minutos u horas.

Según Lopez (2008), la estadística matemática formaliza la noción intuitiva de un suceso identificándola con su volumen o medida relativa en relación con el del universo de posibles resultados de un experimento aleatorio. El método de Monte Carlo utiliza esa identificación en la dirección opuesta, es decir calculando el “volumen” de un conjunto e interpretando dicho volumen como una probabilidad. En el caso más simple eso significa llevar a cabo un muestreo aleatorio del universo de resultados posibles, hacer el recuento de los resultados que pertenecen a un determinado conjunto, calcular la fracción de los resultados pertenecientes a dicho conjunto con respecto al número total de resultados generados, y tomar dicha fracción como una estimación del volumen de dicho conjunto. Dentro de unas hipótesis bastante generales, la ley de los grandes números nos asegura que esa estimación converge al verdadero valor del volumen del conjunto a medida que aumenta el número de resultados generados artificialmente. Además, y de forma crucial, el teorema central del límite facilita información sobre la magnitud del error de estimación cuando el tamaño de la muestra generada es finito, como por otra parte siempre va a suceder.

A sí mismo, Lopez (2008) también indica que de gran utilidad para la aplicación de la metodología Monte Carlo resulta también la identificación de la probabilidad de un suceso con la esperanza matemática de cierta función que pasa a ser, parte de esa identificación, la característica de mayor interés de una variable aleatoria o de una función de ella. Sea X una variable aleatoria unidimensional, $f(x)$ su función de densidad y D el soporte de dicha variable, de modo que:

$$\int_D f(x)dx = 1 \quad (1)$$

$$E[X] = \int_D x f(x)dx \quad (2)$$

$$E[g(X)] = \int_D g(x) f(x)dx \quad (3)$$

$$Pr[X \in S] = \int_S f(x)dx \quad (4)$$

donde $E[X]$ es la esperanza matemática de la variable aleatoria, $g(x)$ es una variable aleatoria obtenida por transformación de (1), teniendo consideraciones como que S sea un subconjunto de D , $S \subset D$. La probabilidad del suceso $X \in S$ es (4).

En la figura 1 se observa que en cada una de las iteraciones el método puede tomar un valor aleatorio del eje Y, así todos los valores del eje tienen la misma posibilidad, en el eje X se obtienen los valores obtenidos por el muestreo de los valores aleatorios del eje Y, los valores del eje Y no se repetirán siempre que la cantidad de iteraciones sea baja, la posibilidad de que los valores aleatorios del eje Y se repitan son directamente proporcionales a la cantidad de iteraciones que se realicen en la simulación. En la Figura 2, la probabilidad de que se repitan los valores del eje Y es mínima ya que solo son 5 iteraciones, los valores que toma el eje Y es de 0,65, 0,57, 0,52, 0,48 y 0,41, cada probabilidad en base al diagrama acumulativo genera un valor en el eje X.

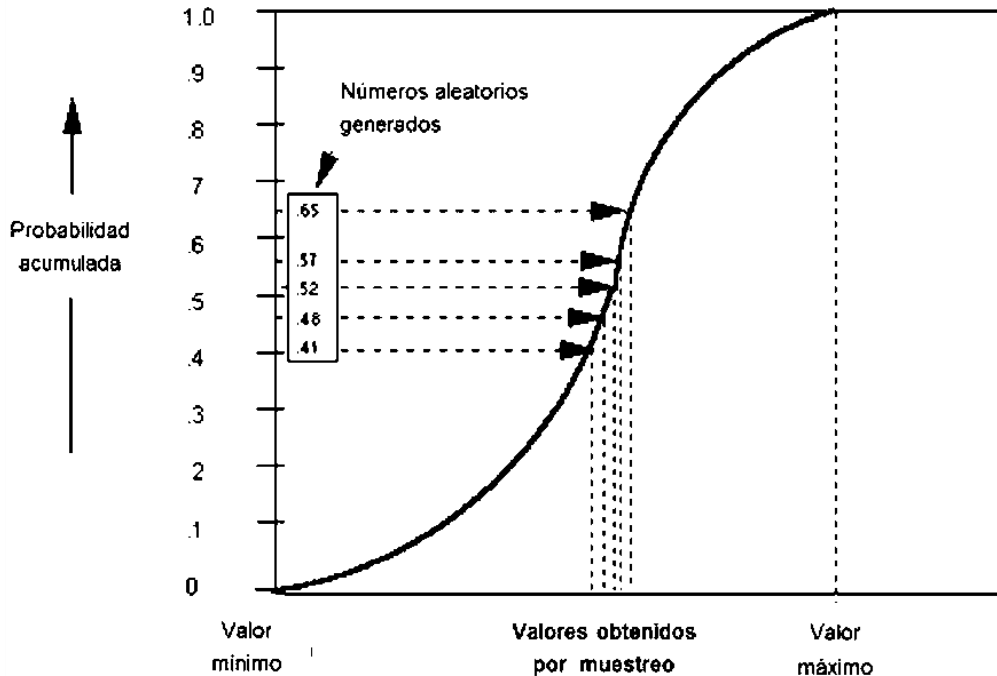


Figura 2. Ejemplo de muestreo Monte Carlo

2.3.2. Marco teórico distribución de probabilidad

La distribución de probabilidad es una función que realiza la asignación de probabilidad de ocurrencia o éxito a cada evento de la variable dentro de un intervalo de posibles resultados. Existen distribuciones de probabilidad discretas o continuas dependiendo de la naturaleza de la variable que la compone, las variables discretas son aquellas que dentro de un rango poseen limitación o separación entre cada uno de los valores que puede ocurrir con la variable, las variables continuas son aquellas que dentro de un rango no poseen limitación o separación entre cada uno de los valores que pueden ocurrir con la variable o sea que dentro del rango o limite pueden tomar cualquier valor. Los valores que puede tomar la variable de valor unitario dentro de un presupuesto no poseen limitación por lo que es una variable continua.

Distribución normal:

Para esta distribución es necesario que se conozcan la media o valor esperado y una desviación estándar que describa la desviación de los datos respecto a la media, es una distribución simétrica continua y los valores que están más cercanos a la media tienen mayor probabilidad de ocurrencia, su grafica es similar a la tradicional curva de “campana”

que se aplica en diversas distribuciones de resultados, la misma no está acotada en ninguno de los dos lados. En Groebner, David Shannon & Fry (2017) y en el manual desarrollado por la empresa Palisade, 2016 para el software @risk 7.6 se puede encontrar que las ecuaciones para determinar esta distribución son:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad (5)$$

donde μ es el parámetro de localización continuo, σ es el parámetro de escalamiento continuo.

Distribución uniforme continua:

Esta distribución es ampliamente utilizada cuando los datos de una variable aleatoria tienen igual posibilidad de ocurrencia en el intervalo en el cual está considerada, se requiere un valor mínimo y un valor máximo. En algunos casos es conocida como distribución de “cero conocimiento”. En Groebner, David Shannon & Fry (2017) se puede encontrar que las ecuaciones para determinar esta distribución son:

$$f(x) = \frac{1}{\max - \min} \quad (6)$$

Distribución triangular:

Para esta distribución es necesario conocer un valor mínimo, un valor máximo y un valor más probable, la misma consiste en que el valor de los extremos es cero y el valor pico es la moda, formando así, con los tres puntos, un gráfico triangular. La dirección de la “desviación” será determinada según sea el valor más probable respecto al mínimo y al máximo. En Groebner, David Shannon & Fry (2017) y en el manual desarrollado por la empresa Palisade, 2016 para el software @risk 7.6 se puede encontrar que las ecuaciones para determinar esta distribución son:

$$f(x) = \frac{2(x - \min)}{(m. \text{likely} - \min)(\max - \min)} \quad \min \leq x \leq \text{más probable} \quad (7)$$

$$f(x) = \frac{2(max - x)}{(max - m. likely)(max - min)} \quad \text{más probable } \leq x \leq max \quad (8)$$

Distribución PERT:

La distribución de PERT (*Program evaluation and review technique*) es necesario tener un valor mínimo, máximo y más probable, el parámetro de forma se calcula a partir del valor más probable, su similitud con la distribución triangular se da ya que posee los mismos 3 parámetros pero se puede considerar como una distribución superior a la triangular, la forma tiene semejanza con la distribución normal sin embargo la posibilidad de ocurrencia de los extremos es superior a la probabilidad de ocurrencia de los extremos en una distribución normal, su grafica se asemeja a una campana pero con menos esbeltez que la normal, según las sugerencias del Project Management Institute (2017), esta distribución es la más apropiada para las contingencias de tiempo y costos de proyectos. En Groebner, David Shannon & Fry (2017) y en el manual desarrollado por la empresa Palisade (2016) para el software @risk 7.6 se puede encontrar que las ecuaciones para determinar la distribución de PERT son:

$$\mu = \frac{min + 4 mlikely + max}{6} \quad (9)$$

$$\alpha_1 = 6 \left[\frac{\mu - min}{max - min} \right] \quad (10)$$

$$\alpha_2 = 6 \left[\frac{max - \mu}{max - min} \right] \quad (11)$$

$$f(x) = \frac{(x - min)^{\alpha_1 - 1} (max - x)^{\alpha_2 - 1}}{B(\alpha_1, \alpha_2) (max - min)^{\alpha_1 + \alpha_2 - 1}} \quad (12)$$

donde min se refiere al valor mínimo del rango de datos, mlikely al valor más probable, max al valor máximo y B se refiere a la función Beta.

Distribución Beta:

Para este tipo de distribución es necesario tener dos valores específicos que pueden ocurrir y tener claramente definido la probabilidad de ocurrencia de cada uno de ellos, estos

valores se denotaran como α_1, α_2 , se genera una distribución beta con un valor mínimo de 0 y un valor máximo de 1, esta es usada usualmente como punto de partida para las funciones tales como Beta General, PERT y Beta Subjetiva. En Groebner, David Shannon & Fry (2017) y en el manual desarrollado por la empresa Palisade (2016) para el software @risk 7.6 se puede encontrar que las ecuaciones para determinar la distribución de PERT son:

$$f(x) = \frac{x^{\alpha_1-1}(1-x)^{\alpha_2-1}}{B(\alpha_1, \alpha_2)} \quad (13)$$

donde B es la función Beta.

2.3.3. Marco teórico regresión no lineal paramétrica

La teoría de regresión que usualmente se conoce tiene la mayoría de sus bases en el supuesto que los datos observados son independientes y se encuentran distribuidos de manera equidistante, sin embargo, la teoría para métodos no paramétricos principalmente esta conformada por una colección de técnicas que permiten realizar el ajuste de funciones de regresión de manera suavizada, esta desarrolla un modelo que tiene cierta libertad para poder predecir la respuesta dentro del rango de valores de los datos ingresados rastreando la dependencia de una variable de respuesta en uno o varios predictores sin definir con antelación la función que relaciona a los predictores con la respuesta.

Estimación mediante núcleos (“Kernel estimation”):

Como se puede observar en Zamora, 2010 los estimadores de tipo núcleo son medias ponderadas de las observaciones y_i , la expresión es del tipo:

$$m_h(x) = \sum_{i=1}^n w_{hi}(x)y_i \quad (14)$$

Donde w_{hi} denota una sucesión de pesos que pueden depender del vector completo x , h es el llamado parámetro de suavizado, también conocido como ancho de banda o ventana, según sea la función peso se va a obtener distintos subtipos de estimadores de núcleo.

Splines de suavizamiento:

En Fox, 2001 se puede encontrar que son aquellos estimadores de la función de regresión que hacen mínima la función:

$$S_h = \sum_{i=1}^n (y_i - m(x_i))^2 + h \int_0^1 m''(x)^2 dx \quad (15)$$

Donde h denota el ancho de banda, el acercamiento del mismo esta controlado por este parámetro de tal manera que si h tiende a infinito se tiene una aproximación a un ajuste por mínimos cuadrados, el estimador resultante es un polinomio de grado 3.

Regresión polinomial (LOESS):

Puede encontrarse en Miñarro, 1998 que se supone m como una función suave o sea que puede ser aproximada de manera local por una función lineal. El estimador polinómico local estará dado por:

$$\beta = (X'WX)^{-1}X'W_y \quad (16)$$

Donde W es la matriz cuadrada de pesos.

2.3.4. Marco teórico grafica de Pareto

Los gráficos de Pareto tienen la capacidad de determinar cuales son los componentes mas importantes de un grupo de datos categorizado, así mismo permite obtener una representación visual rápida de la importancia relativa de cada uno de estos componentes, el manual desarrollado por la empresa Palisade (2016) para el software @risk 7.6 indica que usualmente el 20% de los componentes de un grupo abarca el 80% del valor total del mismo grupo. Para desarrollarlo se debe proceder a determinar el porcentaje relativo que representa cada item del grupo respecto al total del grupo, se organiza de mayor a menor y se calcula el acumulado, teniendo esta información se grafica en el eje X los componentes del grupo y en el eje Y el porcentaje acumulado.

3. METODOLOGÍA

A continuación, se describe la metodología a utilizar durante el desarrollo del proyecto:

3.1. Muestreo de los proyectos de infraestructura vial en el sur occidente colombiano

Se realiza un análisis exploratorio en el SECOP I de proyectos de infraestructura vial de primer orden ejecutados en los últimos 3 años en los departamentos que componen el sur occidente colombiano, se encuentran cerca de 100 proyectos, sobre los proyectos seleccionados se realiza un diagrama de Pareto y se identifican cuáles son las actividades de mayor importancia económica en los proyectos de este tipo, se seleccionan y agrupan como se muestra en la tabla 1, la descripción detallada de cada ítem se encuentra en el anexo 1.

Descripcion
PRELIMINARES
Desmante y limpieza en zonas no boscosas
EXCAVACION DE LA EXPLANACION
Excavacion de la explanacion, canales y prestamo
Transporte de materiales provenientes de la explanacion, canales y prestamo
EXCAVACION DE LA EXPLANACION
Relleno para terraplenes
Sub base granular clase A
Base granular clase A
IMPRIMACION
Riego e imprimacion con emulsion asfaltica
CONCRETO ASFALTICO
Mezcla densa en caliente tipo MDC-19
OBRAS DE PROTECCION
Concreto resistencia 21 Mpa (D) cunetas
SEÑALIZACION
Linea de demarcacion con pintura en frio
Tacha reflectiva
Señal vertical de transito tipo I

Tabla 1. Actividades de mayor importancia económica en proyectos de infraestructura vial de primer orden

De los presupuestos obtenidos en el análisis exploratorio se seleccionan los proyectos que servirán para desarrollar el modelo probabilístico. Los proyectos deben cumplir con los siguientes criterios para ser considerados para el desarrollo del trabajo de grado:

- Los proyectos deben haber sido ejecutados en el sur occidente colombiano, por lo que los departamentos sobre los cuales se realizara el muestreo son: Caldas, Cauca, Huila, Nariño, Quindío, Risaralda, Tolima y Valle del Cauca.
- La capa de rodadura de los proyectos debe ser en pavimento flexible.
- Los proyectos deben ser de infraestructura vial de primer orden.
- Los proyectos deben estar finalizados y con acta de liquidación.

Se obtienen 29 proyectos que cumplen con los requisitos mencionados anteriormente, se revisa cada proceso mediante el cual se ejecutaron los proyectos y se recopila para cada uno el presupuesto ganador y los otros realizados a cada uno de los procesos, 2 presupuestos fueron descartados debido a que estructuras en concreto hidráulico como puentes o muros de contención pesaban más del 51% del presupuesto, en los departamentos de Quindío y Risaralda no se encontraron presupuestos que cumplan con los requisitos mencionados, la información básica de los 27 presupuestos con los que se trabajó se encuentran en la tabla 2 y la información detallada de cada presupuesto en los anexos del 2 al 28.

No. Ppto	Departamento	No. Proceso	Vr. Inicial	Vr. Final	% Aumento
1	Caldas	LP-INFICALDAS-018-2011	\$ 18,499,584,401	\$ 28,959,876,484	57%
2	Caldas	LP-SI-002-2015	\$ 3,588,028,445	\$ 4,923,709,184	37%
3	Cauca	DC-SI-LP-001-2013	\$ 1,128,610,080	\$ 1,224,863,565	9%
4	Cauca	DC-SI-LP-001-2015	\$ 13,014,248,790	\$ 13,900,089,800	7%
5	Cauca	DC-SI-LP-004-2013	\$ 6,058,972,258	\$ 7,395,562,848	22%
6	Cauca	DC-SI-LP-010-2015	\$ 5,330,266,850	\$ 5,894,127,505	11%
7	Cauca	DC-SI-LP-012-2015	\$ 9,668,383,422	\$ 13,824,457,596	43%
8	Cauca	DC-SI-LP-024-2014	\$ 15,714,331,030	\$ 20,084,906,006	28%
9	Cauca	DC-SI-LP-034-2014	\$ 4,592,691,637	\$ 6,224,154,459	36%
10	Huila	SVLPOP003-14	\$ 5,334,789,660	\$ 7,807,168,901	46%
11	Huila	SVLPOP007-17 - 1	\$ 12,673,848,185	\$ 15,154,224,163	20%
12	Huila	SVLPOP007-17 - 2	\$ 15,945,315,321	\$ 19,119,359,102	20%
13	Huila	SVLPOP0011-18	\$ 2,228,353,349	\$ 3,162,913,509	42%
14	Nariño	112014	\$ 9,634,424,871	\$ 12,687,767,705	32%
15	Nariño	0152015	\$ 2,624,379,040	\$ 3,547,481,671	35%
16	Nariño	0252013	\$ 6,703,556,751	\$ 7,572,639,354	13%
17	Nariño	0292014	\$ 83,798,954,810	\$ 85,201,612,935	2%
18	Nariño	0322014	\$ 14,815,353,235	\$ 20,618,502,658	39%
19	Tolima	027	\$ 56,139,138,562	\$ 68,903,845,665	23%
20	Tolima	006	\$ 28,860,894,457	\$ 44,911,227,038	56%
21	Tolima	064	\$ 1,658,638,850	\$ 2,213,114,537	33%
22	Valle del Cauca	330.20.2.13	\$ 2,855,893,917	\$ 4,105,354,461	44%
23	Valle del Cauca	LP-SIV-004-2017	\$ 4,205,607,476	\$ 4,911,431,782	17%
24	Valle del Cauca	LP-SIV-005-2016	\$ 6,904,888,616	\$ 7,074,886,819	2%
25	Valle del Cauca	LP-SIV-008-2017	\$ 16,743,180,413	\$ 16,763,669,541	0.1%
26	Valle del Cauca	LP-SMIT-001-2016	\$ 4,629,080,605	\$ 4,778,962,389	3%
27	Valle del Cauca	LP-SMIT-003-2016	\$ 1,520,323,592	\$ 2,032,165,618	34%

Tabla 2. Información básica presupuestos utilizados para la base de datos

Se realiza la organización y compilación de la información recolectada para cada uno de los proyectos, como se muestra en la tabla 3 se diligencia un formulario de presupuesto realizado en una hoja de cálculo compuesta por: descripción de la actividad, unidad de medida, valor unitario incluido el AIU (Administración, Imprevistos, Utilidad), cantidad y valor total inicial y final de la actividad de la actividad, también contiene el porcentaje de variación entre las condiciones finales e iniciales de la actividad.

Descripción	UM	Vr. Unitario (Inc. AIU)	CONDICIONES INICIALES			CONDICIONES FINALES			% Variación
			Cantidad	Vr. Total (Inc. AIU)	% Peso Ppto	Cantidad	Vr. Total (Inc. AIU)	% Peso Ppto	
Localización y replanteo	Km	\$ 1,432,412	18	\$ 25,783,416.00	0.14%	21	\$ 30,080,652.00	0.10%	17%

Tabla 3. Cantidad, costo inicial y costo final por ítem para cada presupuesto

Se utiliza la información del índice de costos de la construcción pesada (ICCP) del año 2019 publicado por el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE) (2019) como se puede corroborar en la tabla 4, para actualizar todos los valores unitarios incluido el AIU del año de presentación de la oferta al año 2019, así se podrá realizar una comparación directa entre cada uno de los valores unitarios para cada actividad. Con el ICCP del 2019 se agrega a cada una de las hojas de cálculo, una columna con el valor unitario actualizado a 2019.

Mes	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Enero	0.68	1.16	1.70	0.71	0.61	0.85	1.44	1.21	1.06	0.85
Febrero	0.87	2.08	1.26	0.62	0.95	0.93	0.83	1.47	1.05	0.88
Marzo	0.43	0.94	0.49	0.01	0.45	0.54	0.22	0.28	0.33	0.27
Abril	0.20	0.48	0.18	-0.07	0.02	0.33	0.15	-0.23	0.30	0.25
Mayo	0.57	0.67	0.02	-0.09	0.04	0.10	0.17	-0.15	0.31	0.35
Junio	0.21	0.36	-0.11	-0.05	-0.03	0.18	0.14	-0.15	0.06	0.04
Julio	-0.04	0.47	0.09	0.01	0.02	0.02	0.12	0.03	0.07	0.08
Agosto	-0.81	0.53	-0.05	0.00	-0.05	0.22	0.03	0.11	0.06	0.09
Septiembre	-0.51	0.17	-0.13	0.54	-0.06	0.53	-0.43	0.55	0.08	0.13
Octubre	-0.10	0.37	-0.13	0.22	-0.12	0.12	-0.12	0.50	0.02	0.39
Noviembre	-0.17	0.38	-0.04	0.20	0.07	0.15	-0.21	0.43	0.01	0.04
Diciembre	0.24	0.13	0.02	0.06	0.11	0.07	-0.26	0.30	0.11	0.06
Anual	1.57	8.00	3.32	2.18	2.01	4.10	2.09	4.43	3.50	3.47

Tabla 4. Índice de costos de construcción pesada,

Fuente: Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE) (2019)

Teniendo toda la información caracterizada según los puntos anteriores se procede a la ejecución de la fase 2 de desarrollo del modelo probabilístico.

3.2. Desarrollo del modelo probabilístico con datos históricos del sector

Se desarrolla base de datos en una hoja de cálculo teniendo como punto de partida las actividades de la tabla 1, se examina cada uno de los 27 presupuestos de la fase 1 y se alimenta la hoja de cálculo con los valores unitarios incluido el AIU afectados por el ICCP según corresponda para cada una de las actividades, en los casos en los que los presupuestos que alimentan la base de datos no contienen alguna de las actividades del presupuesto base se procede a formular la celda para indicar que la misma está vacía. La tabla 5 ilustra como queda alimentado una parte del modelo hasta el presupuesto 6, por cuestiones de visualización no se coloca una tabla donde se observe el modelo en la hoja de cálculo completo, este puede ser observado de manera completa en el anexo 29.

Descripcion	UM	Cantidad	Vr. Unitario Base (ppto 1)	Vr. Unitario (ppto 2)	Vr. Unitario (ppto 3)	Vr. Unitario (ppto 4)	Vr. Unitario (ppto 5)	Vr. Unitario (ppto 6)
PRELIMINARES								
Desmonte y limpieza en zonas no boscosas	Ha	1.50	\$ 975,500	\$ 965,051	\$ 983,576		\$ 919,077	\$ 964,266
EXCAVACION DE LA EXPLANACION								
Excavacion de la explanacion, canales y prestamo	M3	6,475.00	\$ 10,822	\$ 11,213	\$ 9,546	\$ 10,546	\$ 7,742	\$ 7,440
Transporte de materiales provenientes de la explanacion, canales y prestamo, incluye retiro	M3-km	822,325.00	\$ 924	\$ 1,868	\$ 1,723	\$ 1,904	\$ 1,022	\$ 1,060
EXCAVACION DE LA EXPLANACION								
Relleno para terraplenes	M3	3,700.00	\$ 60,654	\$ 8,154	\$ 6,943	\$ 6,943	\$ 10,028	\$ 14,530
Sub base granular clase A	M3	3,700.00	\$ 176,191	\$ 226,237	\$ 208,325	\$ 118,349	\$ 211,162	\$ 131,899
Base granular clase A	M3	2,775.00	\$ 186,385	\$ 241,287		\$ 119,453	\$ 217,009	\$ 136,579

Tabla 5. Segmento de base de datos con información del análisis exploratorio

Habiendo completado la base de datos se procede con la generación de la distribución de probabilidad y una simulación con muestreo Monte Carlo.

Con la base de datos obtenida, se continua con la configuración para la simulación Monte Carlo en el software @Risk que inicia con seleccionar los datos sobre los cuales se desea realizar la simulación, con esta selección @Risk calcula la media y el rango dentro del cual deben estar los valores proporcionados por la simulación, posteriormente se define la cantidad de iteraciones que se realizaran para la simulación basados en la prueba de contraste presentada por Manly, 2007, se realiza un análisis con un porcentaje de confianza del 99% y 10.000 datos y con un porcentaje de confianza del 99% y 100.000 datos obteniendo que las diferencias con 100.000 datos serán inferiores a 0.008% , se realizan 100.000 iteraciones, diversos autores sugieren que con 10.000 iteraciones es suficiente para obtener un resultado adecuado, sin embargo se decide realizar 10 veces esa cantidad con el fin de obtener resultados mucho más ajustados, el usuario debe realizar

un análisis que determine si los resultados obtenidos con el número de iteraciones escogidas es suficiente o se requiere aumentar, en caso de que sea necesario aumentar el número de iteraciones esto se sugiere hacerlo en aumentos de 10.000 iteraciones, @Risk cuenta con 8 generadores de números aleatorios, se trabaja con el generador MersenneTwister ya que se observa en Palisade, 2016 que es la mejor alternativa cuando se utiliza la simulación Monte Carlo. La simulación tarda cerca de 1 minuto, @Risk tiene 2.147.483.647 iteraciones como máximo, en la figura 3 se puede observar el avance de la simulación realizada para uno de los ítems de la tabla 2.

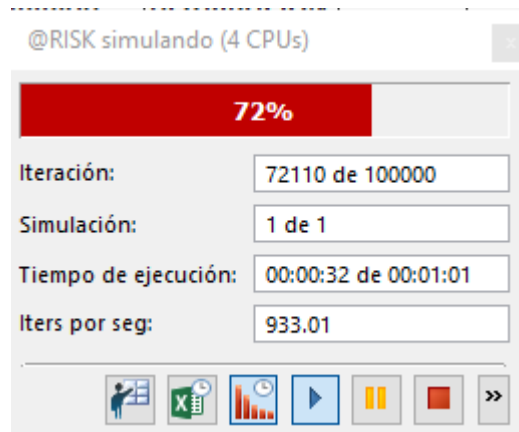


Figura 3. Avance de simulación de Monte Carlos para un ítem de la tabla 2

Fuente: @Risk 7.6

Habiendo realizado la simulación Monte Carlo para cada uno de los ítems de la hoja de cálculo se utiliza el software @Risk para generar las distribuciones de probabilidad para los datos de cada una de las actividades, esto se realiza seleccionando todos los datos producto de la simulación Monte Carlo o sea en este caso 100.000 datos por cada ítem de la tabla 2, se utiliza el comando ajustar de @Risk, en este comando deben ser seleccionadas las funciones de probabilidad de las que contiene el software se desean tomar en cuenta para ajustar a los datos seleccionados, en la figura 4 se observa como @Risk realiza un análisis entre todas las funciones seleccionadas y presenta una lista de jerarquización en orden descendente empezando por la función que más se ajusta a los datos y terminando en la función que menos se ajusta o en las que no tuvieron convergencia para el grupo de datos seleccionado, en la figura 5 se observa el respectivo gráfico del resultado del ajuste a los 100.000 datos de la simulación Monte Carlos según la prueba de idoneidad del criterio de información Akaike (AIC) y el criterio de información Bayesiano (BIC).

Clasificar pc	AIC	Clasificar pc	AIC
<input checked="" type="checkbox"/>	Pert	353.8019	
<input type="checkbox"/>	Cauchy	354.4078	
<input type="checkbox"/>	ExtValueMin	354.4423	
<input type="checkbox"/>	Triang	356.9793	
<input type="checkbox"/>	Laplace	357.0595	
<input type="checkbox"/>	Dagum	358.1765	
<input type="checkbox"/>	HypSecant	358.8276	
<input type="checkbox"/>	Logistic	359.7591	
<input type="checkbox"/>	Normal	361.5137	
<input type="checkbox"/>	Uniform	362.5519	
<input type="checkbox"/>	Weibull	364.2871	
<input type="checkbox"/>	FatigueLife	364.9398	
<input type="checkbox"/>	Rayleigh	367.5332	
<input type="checkbox"/>	ExtValue	368.4260	
<input type="checkbox"/>	Expon	378.6673	
<input type="checkbox"/>	Erlang	380.1339	
<input type="checkbox"/>	Gamma	380.1422	
<input type="checkbox"/>	Pareto	388.4531	
<input type="checkbox"/>	Levy	391.8226	
<input type="checkbox"/>	Erf	394.4761	
<input type="checkbox"/>	Student	737.9355	
<input type="checkbox"/>	BetaGeneral	N/D	
<input type="checkbox"/>	Burr12	N/D	
<input type="checkbox"/>	ChiSq	N/D	
<input type="checkbox"/>	Frechet	N/D	
<input type="checkbox"/>	Invgauss	N/D	
<input type="checkbox"/>	Kumaraswamy	N/D	
<input type="checkbox"/>	Loglogistic	N/D	
<input type="checkbox"/>	Lognorm	N/D	
<input type="checkbox"/>	Lognorm2	N/D	
<input type="checkbox"/>	Pareto2	N/D	
<input type="checkbox"/>	Pearson5	N/D	
<input type="checkbox"/>	Pearson6	N/D	

Figura 4. Lista de jerarquización producto del comando ajuste de @Risk

Fuente: @Risk 7.6

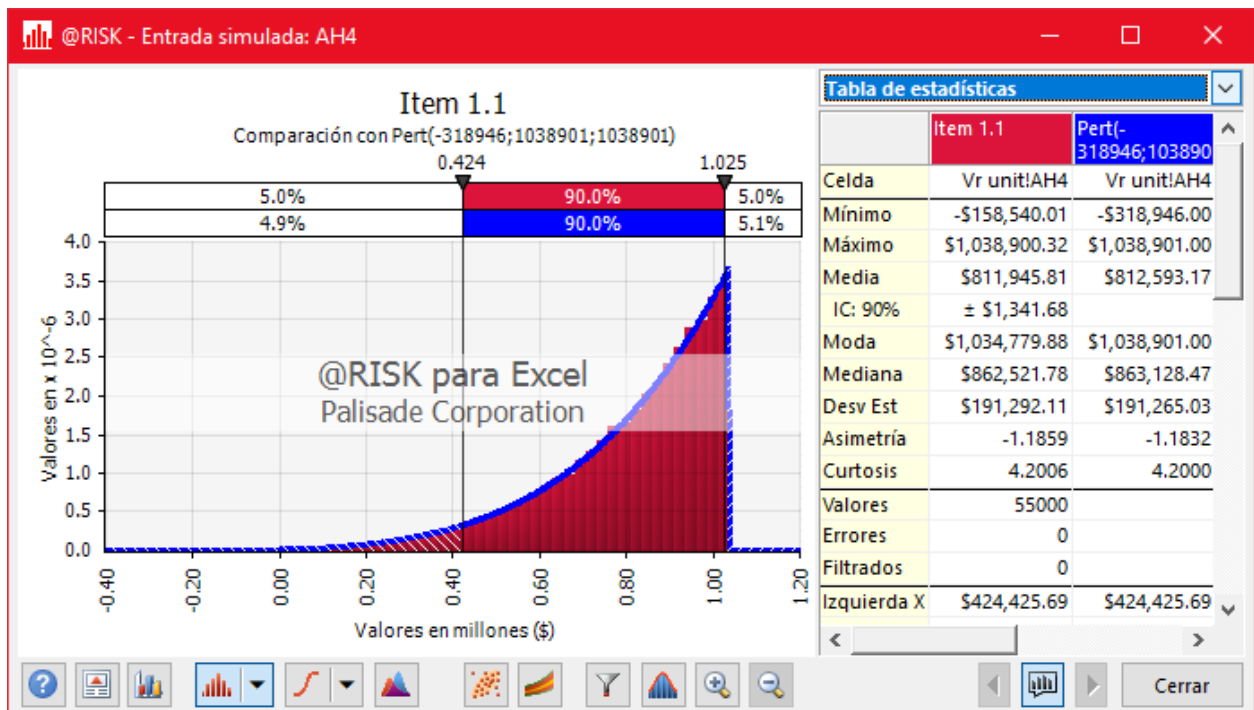


Figura 5. Ajuste de distribución de probabilidad seleccionada a muestra Monte Carlo

Fuente: @Risk 7.6

Habiendo seleccionado la función de probabilidad que mejor describe los datos seleccionados se utiliza la función escribir a celda de @Risk y en una celda del modelo de la hoja de cálculo se escribe el resultado del ajuste como una función de distribución de @Risk, esta distribución se actualiza según se actualicen los datos que alimentan el modelo en la hoja de cálculo.

Con la finalidad de obtener la distribución de probabilidad que mejor represente cada una de las actividades de la hoja de cálculo se plantean tres escenarios para cada actividad del presupuesto base, en la tabla 6 se puede observar el resultado numérico de los tres escenarios propuestos.

El primero consiste en utilizar toda la gama de funciones que permite seleccionar @Risk, estas son BetaGeneral, Burr12, Cauchy, ChiSq, Dagum, Erf, Erlang, Expon, ExtValue, ExtValueMin, FatigueLife, Frechet, Gamma, HypSecant, InvGauss, Kumaraswamy, Laplace, Levy, Logistic, LogLogistic, Lognorm, Lognorm2, Normal, Pareto, Pareto2, Pearson5, Pearson 6, Pert, Rayleigh, Student, Triang, Uniform y Weibull de @Risk, el resultado grafico de este escenario puede observarse en la figura 6.

El segundo escenario consiste en utilizar solo la función Pert de @Risk y su resultado grafico se observa en la figura 7.

Finalmente, el tercero consiste en seleccionar las funciones Pert, Triang y Uniform de @Risk, el resultado grafico se observa en la figura 8.

Descripcion	UM	DISTRIBUCIONES	Nombre	DISTRIBUCIONES	Nombre	DISTRIBUCIONES	Nombre
PRELIMINARES							
Desmonte y limpieza en zonas no boscosas	Ha	812,593.17	Pert	1,218,889.75	Pert	1,218,890.42	Pert
EXCAVACION DE LA EXPLANACION							
Excavacion de la explanacion, canales y prestamo	M3	60,230,351.21	Loglogistic	60,231,313.33	Pert	60,231,501.18	Pert
Transporte de materiales provenientes de la explanacion, canales y prestamo, incluye retiro	M3-km	1,336,442,590.00	Triang	1,337,470,496.25	Pert	1,336,468,532.02	Triang
EXCAVACION DE LA EXPLANACION							
Relleno para terraplenes	M3	147,015,183.33	Pert	91,676,750.00	Pert	91,676,873.99	Pert
Sub base granular clase A	M3	566,936,200.00	Triang	567,517,716.67	Pert	566,938,645.84	Triang
Base granular clase A	M3	455,689,190.02	Rayleigh	457,970,737.50	Pert	455,877,444.71	Triang
IMPRIMACION							
Riego e imprimacion con emulsion asfaltica	M2	58,800,439.88	Weibull	59,400,025.00	Pert	59,243,855.76	Triang
CONCRETO ASFALTICO							
Mezcla densa en caliente tipo MDC-19	M3	893,545,800.00	Uniform	886,619,000.00	Pert	893,546,669.85	Uniform
OBRAS DE PROTECCION							
Concreto resistencia 21 Mpa (D) cunetas	M3	256,471,560.00	Hypsecant	264,813,000.00	Pert	259,084,633.99	Triang
SEÑALIZACION							
Linea de demarcacion con pintura en frio	ML	27,382,000.00	Loglogistic	27,382,000.00	Pert	27,381,834.59	Pert
Tacha reflectiva	UND	44,434,500.00	Uniform	44,404,000.00	Pert	44,434,641.84	Uniform
Señal vertical de transito tipo I	UND	27,578,959.82	Weibull	27,586,468.75	Pert	27,574,522.86	Triang

Tabla 6. Resultado numérico tres escenarios de selección de funciones para el ajuste en @Risk.

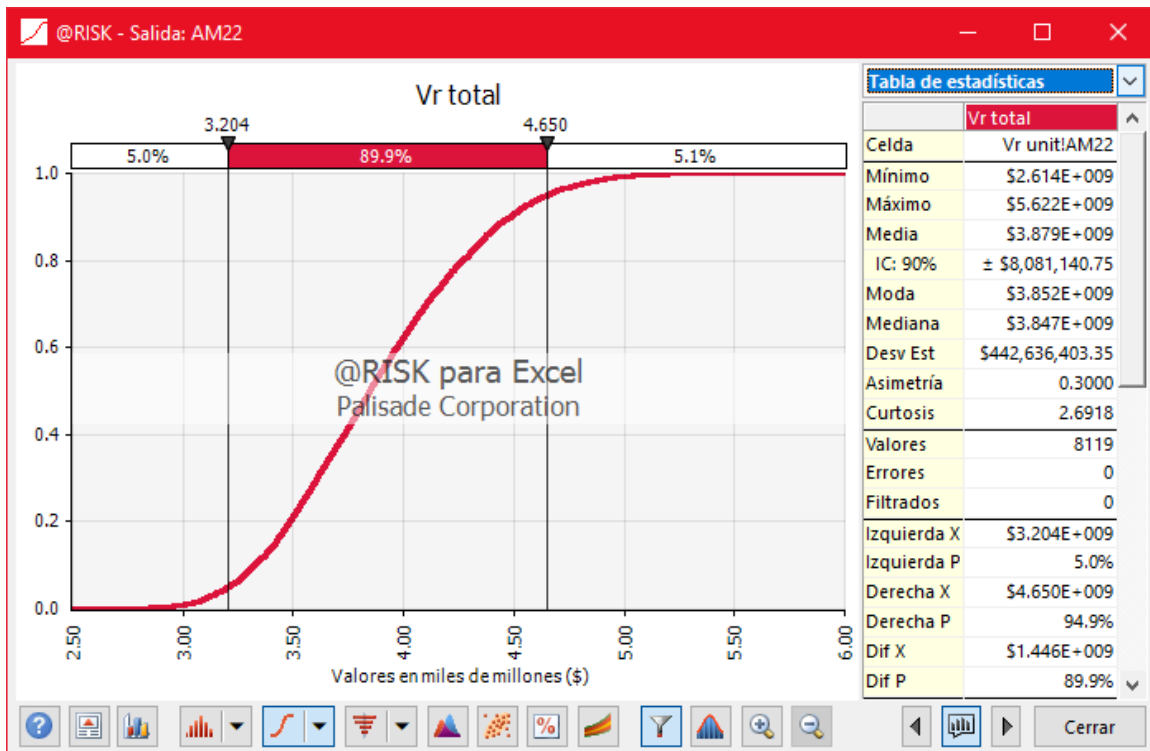


Figura 6. Curva de distribución de probabilidad acumulada escenario 1

Fuente: @Risk 7.6

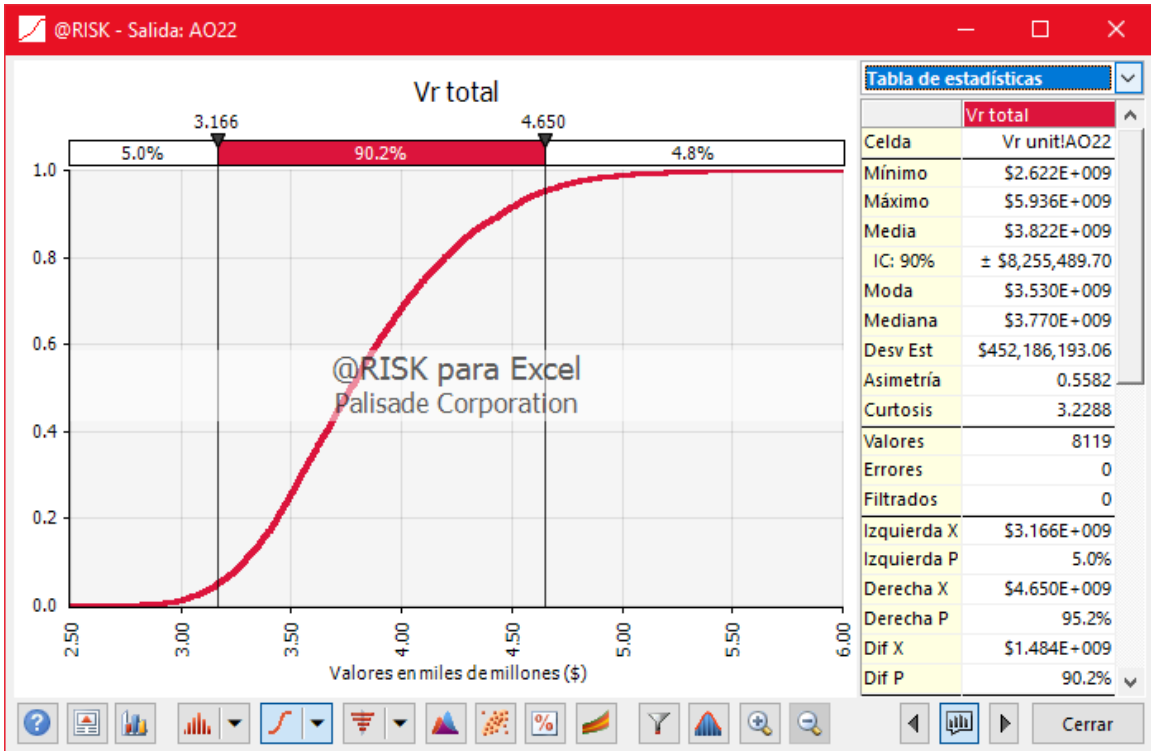


Figura 7. Curva de distribución de probabilidad acumulada escenario 2

Fuente: @Risk 7.6

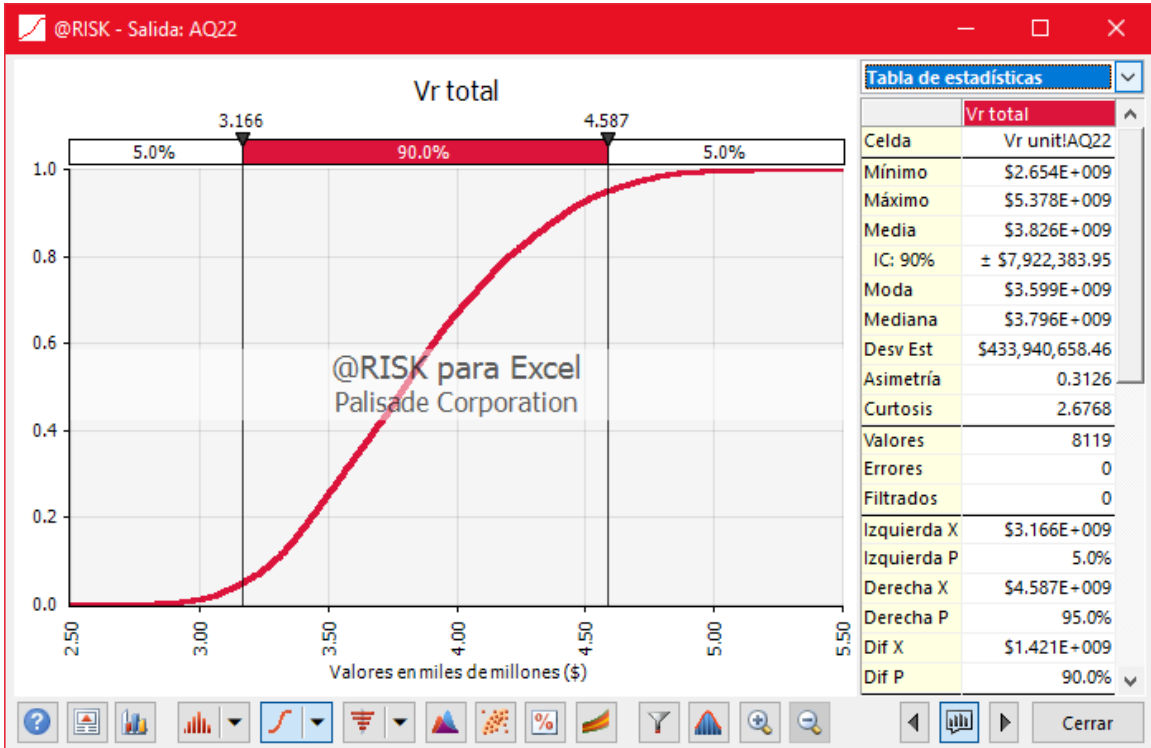


Figura 8. Curva de distribución de probabilidad acumulada escenario 3

Fuente: @Risk 7.6

Comparando los tres escenarios y viendo la estrecha similitud entre los resultados de los mismos se toma la determinación de usar la distribución de PERT como sugiere el PMBOK del Project Management Institute (2017) se procede a obtener la curva de probabilidad y curva de probabilidad acumulada, con las 100.000 observaciones de la curva de probabilidad acumulada compuesta en el eje X por valor unitario y en el eje Y por la probabilidad acumulada, en los anexos 30 a 41 se pueden observar la totalidad de los datos obtenidos de las curvas de distribución de probabilidad, posterior a esto se procede a realizar una regresión no lineal paramétrica con estimación mediante núcleos de tipo Fourier en la herramienta Curve Fitting del Software Matlab como se observa en la figura 9 para determinar las ecuaciones para el modelo probabilístico, se probaron otros tipos de estimaciones como regresión polinómica o Gaussiana pero debido a la forma de las curvas de distribución de probabilidad acumulada se obtenían resultados con variaciones de $\pm 5\%$ lo que cual estaba fuera de los márgenes tolerables, en este modelo probabilístico se puede determinar según los valores unitarios del proyecto a ejecutar, cual deberá ser el valor destinado para la reserva según el costo base y el costo planificado que desee el usuario, para cada uno de los ítems se obtienen ecuaciones de la forma

$$p = a_0 + \sum_{i=1}^8 a_i * \cos(ixw) + b_i \sin(ixw) \quad (17)$$

Donde p es el porcentaje acumulado, a_0 , a_i , b_i y w son constantes diferentes para cada ítem y x es el valor unitario del presupuesto del usuario.

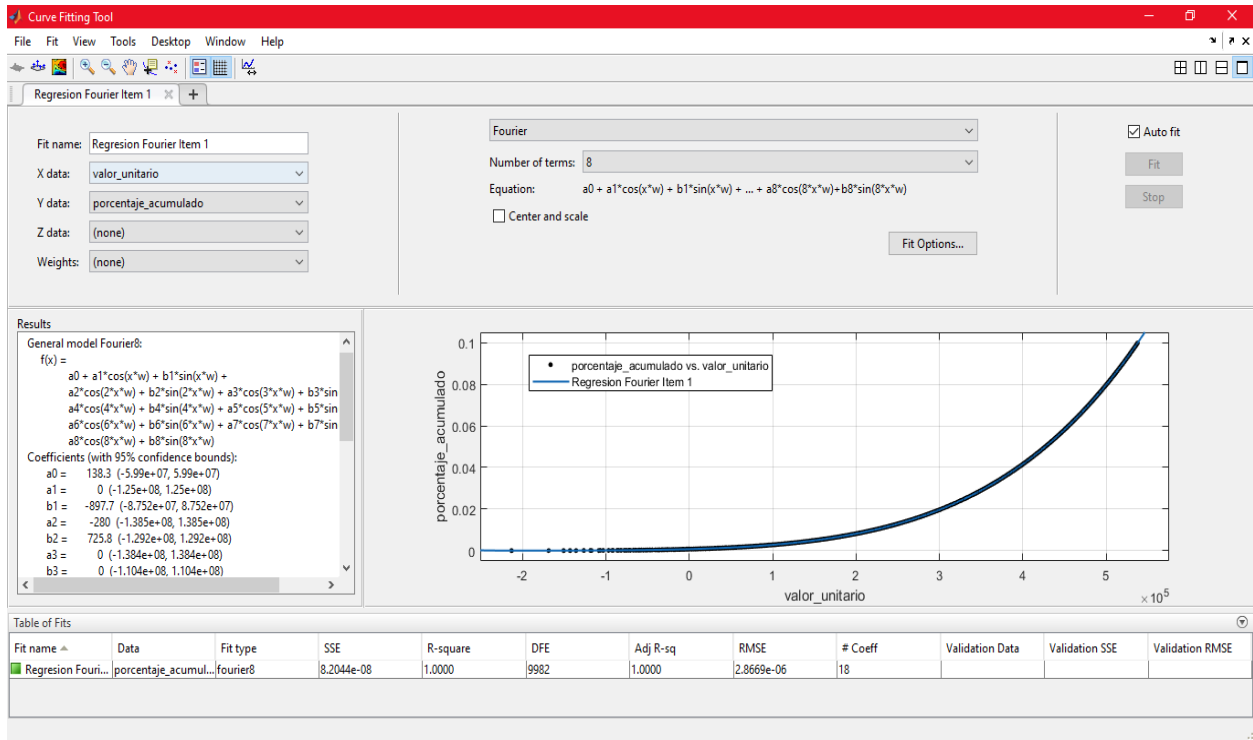


Figura 9. Ajuste de regresión lineal no paramétrica usando Fourier en Curve Fitting Tool de Matlab

Fuente: Matlab R2019a

En la tabla 7 se observan las limitaciones a los valores unitarios de los presupuestos que el usuario desee evaluar ya que en los extremos de las ecuaciones de regresión no lineal paramétrica tiene comportamientos atípicos, en la tabla 7 se indican rangos entre el 50% y el 95% de confiabilidad, sin embargo, es pertinente aclarar que en el medio los valores usuales y convencionales que se trabajan son el 80%, el 85% y el 90% de confiabilidad. Es necesario realizar la aclaración que se pueden presentar diferencias entre los valores presentados en esta tabla y los presentados en APU'S oficiales ya que los valores con los cuales se realizó esta investigación corresponden a los costos finales por cada actividad reportados por los contratistas que ejecutaron los proyectos con los cuales se realizó el análisis.

Descripcion	UM	Min 50%	Max 95%
PRELIMINARES			
Desmante y limpieza en zonas no boscosas	Ha	\$ 863,132	\$ 1,038,900
EXCAVACION DE LA EXPLANACION			
Excavacion de la explanacion, canales y prestamo, incluye retiro	M3	\$ 8,927	\$ 17,212
Transporte de materiales provenientes de la explanacion, canales y prestamo, incluye retiro	M3-km	\$ 1,532	\$ 3,641
EXCAVACION DE LA EXPLANACION			
Relleno para terraplenes	M3	\$ 20,722	\$ 103,725
Sub base granular clase A	M3	\$ 150,094	\$ 298,003
Base granular clase A	M3	\$ 161,822	\$ 306,572
IMPRIMACION			
Riego e imprimacion con emulsion asfaltica	M2	\$ 3,940	\$ 8,229
CONCRETO ASFALTICO			
Mezcla densa en caliente tipo MDC-19	M3	\$ 740,064	\$ 961,388
OBRAS DE PROTECCION			
Concreto resistencia 21 Mpa (D) cunetas	M3	\$ 732,760	\$ 1,220,533
SEÑALIZACION			
Linea de demarcacion con pintura en frio	ML	\$ 2,480	\$ 7,994
Tacha reflectiva	UND	\$ 11,937	\$ 17,101
Señal vertical de transito tipo I	UND	\$ 444,123	\$ 640,145

Tabla 7. Limitaciones a los valores unitarios del presupuesto a evaluar

4. METODOLOGIA PROPUESTA

Se resume la metodología desarrollada en este trabajo de grado para que pueda ser implementada por ingenieros, técnicos, tecnólogos o diversos profesionales que requieran realizar la estimación de contingencia de costos para proyectos de infraestructura vial de primer orden en el sur occidente colombiano, adicionalmente esta metodología puede ser aplicada para cualquier proyecto de construcción siempre y cuando se cuente con la información necesaria para desarrollarla, con esto se da cumplimiento a cabalidad el objetivo general y los objetivos específicos planteados para el trabajo de grado.

Paso 1: Crear una base de datos que contenga las actividades sobre las cuales desea conocer la reserva según el costo planificado deseado, para utilizar una distribución de Pert en la presente investigación se obtuvieron buenos resultados con mínimo 10 valores unitarios finales para cada una de estas actividades, en caso de tener mínimo tres valores unitarios se sugiere usar la distribución triangular.

Paso 2: Realizar una simulación Monte Carlo con al menos 10.000 iteraciones con el fin de ampliar el rango de datos a utilizar en el ajuste de la distribución, para obtener mejores resultados se pueden utilizar 100.000 iteraciones.

Paso 3: Realizar un ajuste de distribución de Pert, Triangular o a la que mejor se ajuste según los datos, según el criterio mencionado en el punto 1, a los datos obtenidos de la simulación Monte Carlo.

Paso 4: Obtener los datos correspondientes a la distribución de probabilidad acumulada resultado del punto 3.

Paso 5: Realizar una regresión paramétrica no lineal utilizando series de Fourier para obtener las ecuaciones que permiten hallar cualquier valor de reserva según la necesidad del usuario.

5. PROPUESTA DE SOFTWARE

Para el desarrollo de Cost-Reserve se implementa el software matemático MATLAB, este ofrece un entorno de desarrollo integrado para la creación de interfaz gráfica, este posee su propio lenguaje de programación, el lenguaje M. Se construye un entorno de ventanas que contienen los elementos para los respectivos cálculos, ventana de bienvenida la cual tiene como propósito dar información básica de Cost-Reserve y la bienvenida al programa, ventana de información del proyecto que tiene como propósito registrar la información del mismo, cabe aclarar que si no se diligencian estos campos no se podrá continuar al diseño, una ventana en la cual se puede ingresar las cantidades, costos y porcentaje de confiabilidad deseado y una ventana en la cual se presentan los resultados de los cálculos respectivos según la información ingresada. La interfaz de Cost-Reserve cuenta con cerca de 2.000 líneas de código, están son digitadas en su totalidad sin utilizar la herramienta para diseño de interfaz que proporciona Matlab, esto debido a que el digitar todas las líneas una a una da mayor control sobre el código que se programa y la función que tiene cada línea (Figura 10).

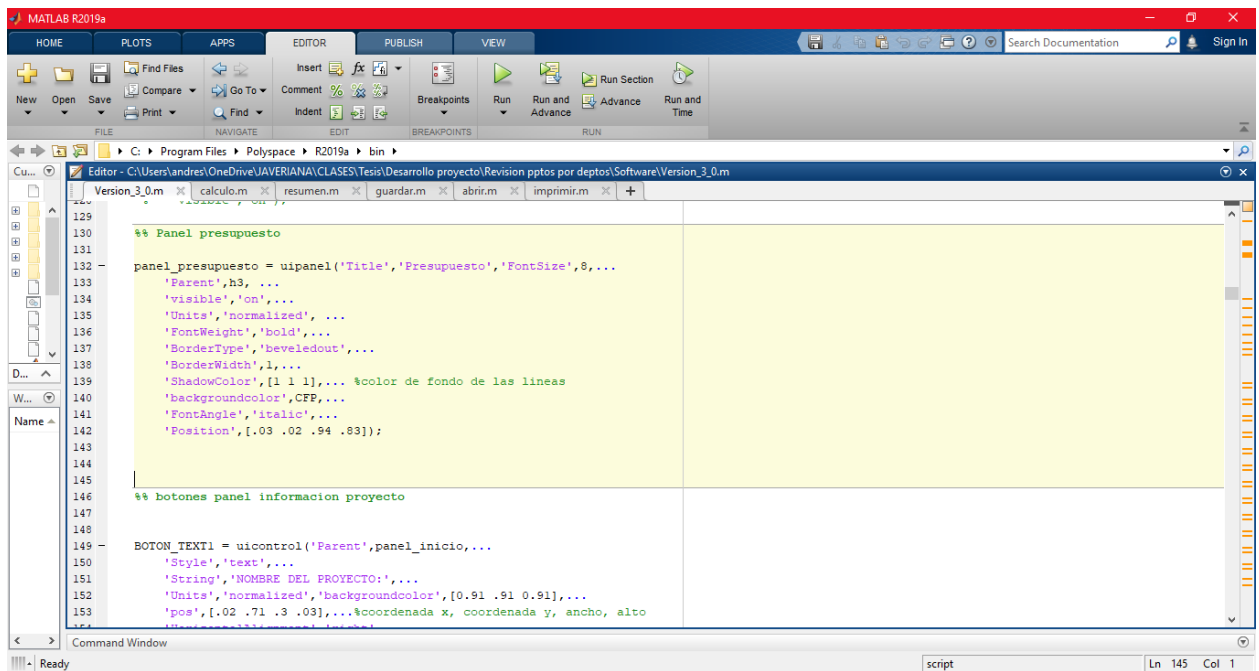


Figura 10. Imagen de ilustración sobre el desarrollo de Cost-Reserve en la interfaz gráfica

Fuente: Matlab R2019a

Habiendo programado la interfaz se procedió a programar las ecuaciones obtenidas y a programar las diferentes opciones de guardar, cargar, abrir, cerrar y generar reporte, la

programación de cada uno de estos fue realizada de manera independiente en otras ventanas de comando (otros archivos) siendo llamados por el archivo principal en el momento de ser necesario, cada programación cuenta con una estructura similar que consta de una validación de errores al iniciar la ejecución del archivo, los errores pueden ser celdas vacías, valores incorrectos en dichas celdas o valores no permitidos, posterior a la validación se evalúa la fórmula según sea el caso obteniendo un espesor de diseño basado en los parámetros ingresados.

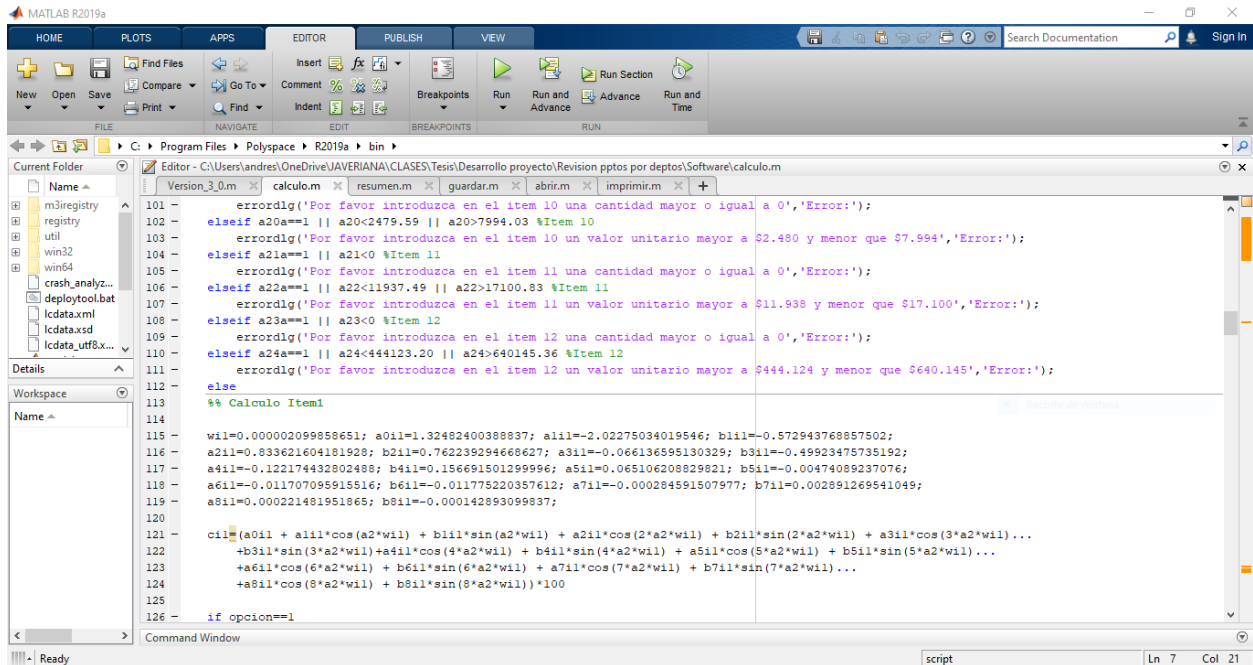


Figura 11. Imagen de ilustración sobre el desarrollo de Cost-Reserve en el cálculo interno

Fuente: Matlab R2019a

Se desarrolla un manual de usuario para la implementación de Cost-Reserve, este inicia con el objetivo del software y con el procedimiento básico para la instalación, posterior a esto se encuentran una serie de ilustraciones con indicaciones sobre el manejo del mismo, es bastante detallado en un paso a paso, contiene los errores más frecuentes en el uso de este y como utilizar todas y cada una de las opciones que tiene a disposición el usuario.



Figura 12. Imagen de bienvenida a Cost-Reserve

Cost-Reserve es una herramienta de uso académico y su uso no compromete a sus autores, debe ser usado responsablemente ingresando valores coherentes ajustados a la realidad del mercado, la base de datos usada es muy específica según describe la tabla 2 por lo que si el usuario desea utilizar la metodología para otras zonas del país diferente al sur occidente colombiano debe crear una nueva base de datos con información del sector que desea evaluar, el usuario debe ceñirse a la descripción literal para cada ítem y no hacer suposiciones acerca de los mismos, el primer paso para iniciar con la implementación de Cost-Reserve es necesario leer el manual de usuario incluido en el instalador del mismo.

6. RESULTADOS Y ANALISIS

propósito de este apartado es dar a conocer los resultados en cuanto a graficas relacionadas con los valores esperados y valores obtenidos de los ajustes de regresión lineal no paramétrica. Para cada uno de las actividades de la tabla 2 se realiza un análisis de valor unitario vs % acumulado de los datos de la curva de acumulación de probabilidad y de la ecuación del modelo de probabilidad. Obteniendo en todos una precisión de $\pm 0.02\%$, se observa en las figuras 18 a 29, como los puntos de color negro son los datos tomados de la distribución de probabilidad acumulada para el ítem y la línea roja es la ecuación de la forma expresada en la ecuación 17 obtenida mediante la regresión lineal no paramétrica usando Fourier para este ítem. En la figura se grafica el valor esperado de probabilidad acumulada y el valor calculado mediante la ecuación producto de la regresión lineal no paramétrica obteniendo en todos un valor de $R^2 > 0.9999999$, con un valor de suma de los cuadrados residuales SSE máximo de 0.001 y de error cuadrático RMSE máximo de 0.0000002867, se observa adicionalmente que todos los datos están estrechamente ceñidos a la línea de 45° , con estos 4 indicadores se verifica una altísima precisión de los resultados obtenidos.

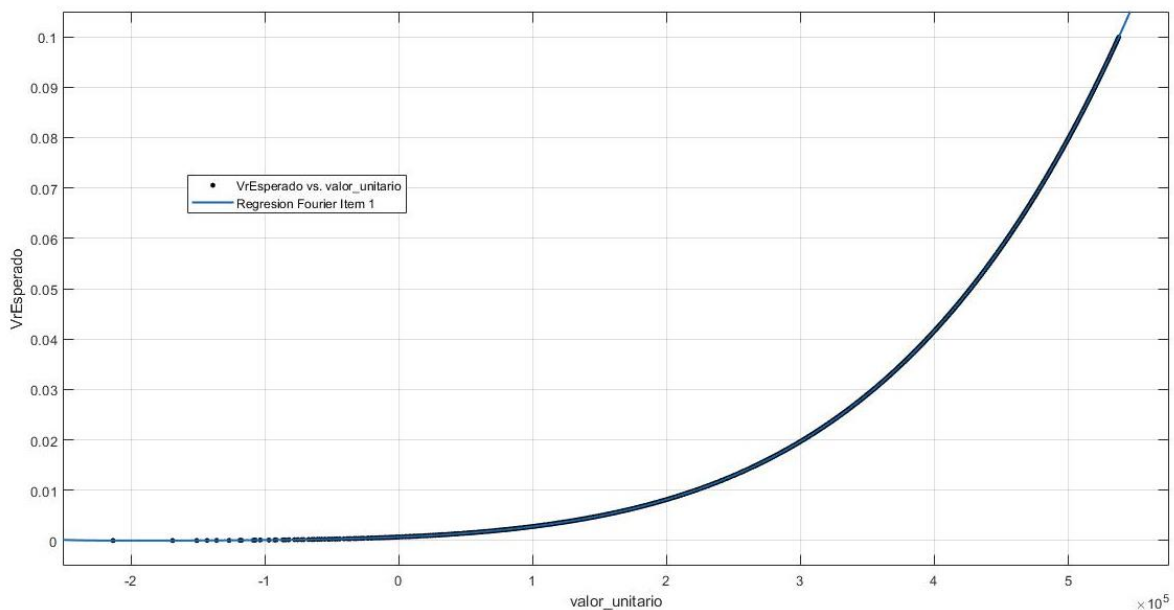


Figura 13. Valor esperado según datos de simulación Monte Carlo y valor calculado con ecuación obtenida de la regresión lineal no paramétrica usando Fourier ítem 1 de la tabla 2.

Fuente: Matlab R2019a

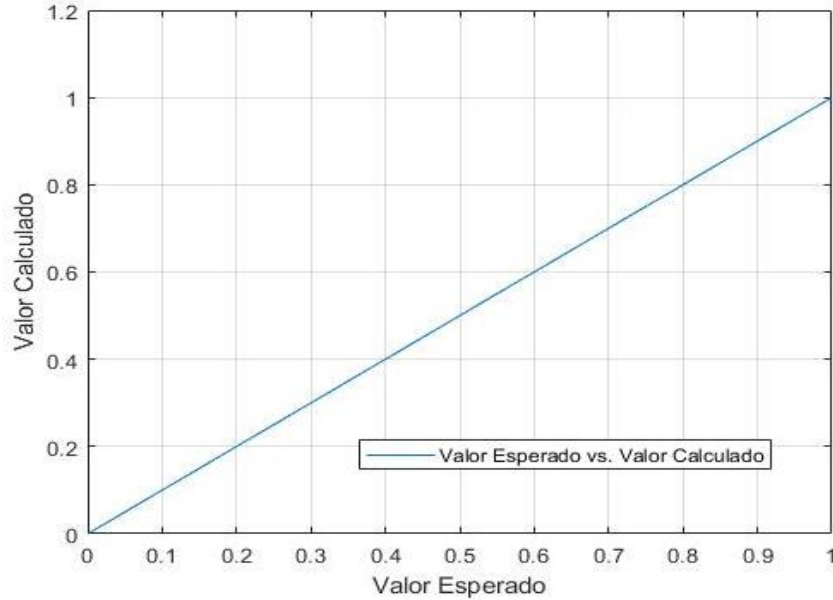


Figura 14. Valor esperado vs valor calculado para el ítem 1 de la tabla 2.

Descripcion	SSE	R ²	RMSE
PRELIMINARES			
Desmonte y limpieza en zonas no boscosas	8.278E-07	1.0000000	2.878E-06
EXCAVACION DE LA EXPLANACION			
Excavacion de la explanacion, canales y prestamo	8.538E-07	1.0000000	2.922E-06
Transporte de materiales provenientes de la explanacion, canales y prestamo, incluye retiro	1.814E-02	0.9999978	4.259E-04
EXCAVACION DE LA EXPLANACION			
Relleno para terraplenes	1.232E-02	0.9999985	3.510E-04
Sub base granular clase A	7.671E-03	0.9999991	2.770E-04
Base granular clase A	1.368E-02	0.9999984	3.699E-04
IMPRIMACION			
Riego e imprimacion con emulsion asfaltica	9.304E-03	0.9999988	3.050E-04
CONCRETO ASFALTICO			
Mezcla densa en caliente tipo MDC-19	1.594E-02	0.999998	3.992E-04
OBRAS DE PROTECCION			
Concreto resistencia 21 Mpa (D) cunetas	1.453E-02	0.9999982	3.812E-04
SEÑALIZACION			
Linea de demarcacion con pintura en frio	8.548E-03	0.9999989	2.924E-04
Tacha reflectiva	1.377E-02	0.9999983	3.711E-04
Señal vertical de transito tipo I	7.138E-03	0.9999991	2.672E-04

Tabla 8. Valor esperado según datos de simulación Monte Carlo y valor calculado con ecuación obtenida de la regresión lineal no paramétrica usando Fourier para los ítems de la tabla 2.

Se realiza la verificación de los resultados obtenidos con las ecuaciones con las que se programó posteriormente Cost-Reserve analizando proyectos con las características de los analizados en la tabla 2, a cada uno de estos proyectos se les da el mismo tratamiento descrito en el documento, se evalúa el incremento de costo en estas actividades y el obtenido con Cost-Reserve, en la tabla 9 se observa el departamento de donde fue seleccionado el presupuesto a evaluar, teniendo en cuenta que se encuentre dentro de los utilizados para desarrollar la metodología, el número de proceso con el cual se encuentra identificado en el SECOP, el aumento o disminución en el costo final de ejecución y los resultados obtenidos con las ecuaciones con las que posteriormente se desarrolló Cost-Reserve, se encuentra la confiabilidad seleccionada para hacer la comparación y finalmente la variación obtenida entre ambos resultados, se puede observar que la misma es inferior al 4% siendo resultados bastante satisfactorios .

Departamento	No. Proceso	Aumento	Cost-Reserve	Confiabilidad	Variacion
Cauca	DC-SI-LP-014-2014	\$ 2,875,216,193	\$ 2,949,185,574	90%	2.57%
Huila	LP001 DE 2016	\$ 2,754,889,297	\$ 2,804,587,630	90%	1.80%
Tolima	LP N. 010 DE 2017	-\$ 91,324,543	-\$ 88,084,509	90%	-3.55%
Valle	330-015-008-003	\$ 7,238,466,019	\$ 7,406,181,277	90%	2.32%

Tabla 9. Verificación Cost-Reserve

7. CONCLUSIONES Y SUGERENCIAS PARA FUTUROS TRABAJOS DE GRADO

En el documento que se presenta se cuenta una clara justificación y necesidad de desarrollar una metodología que permita la estimación de contingencias en costos para proyectos de infraestructura vial de primer orden, pero no solo desarrollar la metodología sino desarrollar una herramienta que permita implementar esa metodología desarrollada de manera rápida, ágil, confiable y de uso libre. La precisión de la herramienta desarrollada tiene un error inferior al 0.05% respecto a los gráficos de distribución de probabilidad acumulada obtenidos.

Implementar esta metodología desde el inicio puede tardar semanas e incluso meses, adicionalmente requiere el conocimiento de software especializado en riesgos como lo es @Risk, por ello se lleva el trabajo más allá a lo planteado inicialmente en los objetivos y se le entrega al usuario la herramienta y con ella la posibilidad de implementar la metodología de manera casi inmediata, ahorrando así el tiempo mencionado.

La metodología desarrollada y corroborada abre la posibilidad a futuros trabajos de grado o trabajos de entidades públicas y privadas que quieran ampliar la base de datos recopilada en este estudio, que quieran trabajar con otro tipo de proyectos de construcción más allá de los de infraestructura vial, para desarrollar ecuaciones o herramientas de tipo software que permitan incluir en proyectos propios el análisis de riesgo, hoy en día las empresas manejan software de tipo ERP que les permiten analizar los costos finales de cada una de las actividades realizadas en sus proyectos con lo cual tienen al alcance una base de datos que les puede permitir desarrollar la metodología planteada y a su vez conocer con antelación el monto de reserva que deben de tener para su proyecto y así mismo evitar que este monto de reserva salga directamente de las utilidades de los inversionistas por no haber sido considerado en un principio.

Desde el punto de vista de las entidades públicas esta herramienta permite con suma antelación conocer cuál será el monto de reserva que debe tener la entidad y tramitar los certificados de disponibilidad presupuestal por un valor superior y más cercano al que seguramente será el valor final del proyecto, esto acabara con los problemas que se explicaron inicialmente sobre tiempos y sobre costos en la consecución de nuevos recursos para el proyecto cuando este requiere un otrosí por dinero. Adicionalmente le permitirá a la entidad evaluar las propuestas y determinar las que sean potencialmente bajas y peligrosas para la ejecución del proyecto.

La herramienta entregada para la implementación de esta metodología permitirá a los profesionales y entidades empezar a incluir en las fases de planificación del proyecto el monto de reserva presupuestal según el nivel de confiabilidad deseado y con esto complementar el análisis de riesgos realizado para el proyecto en fase de desarrollo.

Es necesario realizar la aclaración que se pueden presentar diferencias entre los valores presentados en esta tabla y los presentados en APU'S oficiales ya que los valores con los cuales se realizó esta investigación corresponden a los costos finales por cada actividad reportados por los contratistas que ejecutaron los proyectos con los cuales se realizó el análisis.

8. ANEXOS

En este capítulo se hará una descripción sobre cada uno de los anexos que componen el CD, esto debido a que a mi consideración es más fácil verificar los resultados en Excel que en medio físico debido a lo extenso de las tablas y que para poder que se adaptaran al tamaño de una hoja debían ser reducidas hasta un tamaño prácticamente ilegible por el lector. También se anexa por supuesto el software para que sea trabajado por el lector del documento permitiéndole corroborar lo mencionado en el documento.

8.1. Presupuestos usados para desarrollar el modelo probabilístico

Anexo 1. Descripción técnica de las actividades de la tabla 1.

Anexo 2. Este anexo contiene toda la información del presupuesto 1 de la tabla 2.

Anexo 3. Este anexo contiene toda la información del presupuesto 2 de la tabla 2.

Anexo 4. Este anexo contiene toda la información del presupuesto 3 de la tabla 2.

Anexo 5. Este anexo contiene toda la información del presupuesto 4 de la tabla 2.

Anexo 6. Este anexo contiene toda la información del presupuesto 5 de la tabla 2.

Anexo 7. Este anexo contiene toda la información del presupuesto 6 de la tabla 2.

Anexo 8. Este anexo contiene toda la información del presupuesto 7 de la tabla 2.

Anexo 9. Este anexo contiene toda la información del presupuesto 8 de la tabla 2.

Anexo 10. Este anexo contiene toda la información del presupuesto 9 de la tabla 2.

Anexo 11. Este anexo contiene toda la información del presupuesto 10 de la tabla 2.

Anexo 12. Este anexo contiene toda la información del presupuesto 11 de la tabla 2.

Anexo 13. Este anexo contiene toda la información del presupuesto 12 de la tabla 2.

Anexo 14. Este anexo contiene toda la información del presupuesto 13 de la tabla 2.

Anexo 15. Este anexo contiene toda la información del presupuesto 14 de la tabla 2.

Anexo 16. Este anexo contiene toda la información del presupuesto 15 de la tabla 2.

Anexo 17. Este anexo contiene toda la información del presupuesto 16 de la tabla 2.

Anexo 18. Este anexo contiene toda la información del presupuesto 17 de la tabla 2.

Anexo 19. Este anexo contiene toda la información del presupuesto 18 de la tabla 2.

Anexo 20. Este anexo contiene toda la información del presupuesto 19 de la tabla 2.

Anexo 21. Este anexo contiene toda la información del presupuesto 20 de la tabla 2.

Anexo 22. Este anexo contiene toda la información del presupuesto 21 de la tabla 2.

Anexo 23. Este anexo contiene toda la información del presupuesto 22 de la tabla 2.

Anexo 24. Este anexo contiene toda la información del presupuesto 23 de la tabla 2.

Anexo 25. Este anexo contiene toda la información del presupuesto 24 de la tabla 2.

Anexo 26. Este anexo contiene toda la información del presupuesto 25 de la tabla 2.

Anexo 27. Este anexo contiene toda la información del presupuesto 26 de la tabla 2.

Anexo 28. Este anexo contiene toda la información del presupuesto 27 de la tabla 2.

Anexo 29. Compilado de presupuestos del 1 al 27.

8.2. Datos curva de probabilidad acumulada

Anexo 30. Este anexo contiene todos los datos de la curva de probabilidad acumulada del ítem 1 de la tabla 1.

Anexo 31. Este anexo contiene todos los datos de la curva de probabilidad acumulada del ítem 2 de la tabla 1.

Anexo 32. Este anexo contiene todos los datos de la curva de probabilidad acumulada del ítem 3 de la tabla 1.

Anexo 33. Este anexo contiene todos los datos de la curva de probabilidad acumulada del ítem 4 de la tabla 1.

Anexo 34. Este anexo contiene todos los datos de la curva de probabilidad acumulada del ítem 5 de la tabla 1.

Anexo 35. Este anexo contiene todos los datos de la curva de probabilidad acumulada del ítem 6 de la tabla 1.

Anexo 36. Este anexo contiene todos los datos de la curva de probabilidad acumulada del ítem 7 de la tabla 1.

Anexo 37. Este anexo contiene todos los datos de la curva de probabilidad acumulada del ítem 8 de la tabla 1.

Anexo 38. Este anexo contiene todos los datos de la curva de probabilidad acumulada del ítem 9 de la tabla 1.

Anexo 39. Este anexo contiene todos los datos de la curva de probabilidad acumulada del ítem 10 de la tabla 1.

Anexo 40. Este anexo contiene todos los datos de la curva de probabilidad acumulada del ítem 11 de la tabla 1.

Anexo 41. Este anexo contiene todos los datos de la curva de probabilidad acumulada del ítem 12 de la tabla 1.

8.3. Software

Anexo 42. Instalador Cost-Reserve

Anexo 43. Manual de usuario de Cost-Reserve

9. REFERENCIAS BLIBLIOGRAFICAS

- Bakhshi, P., y Touran, A. (2014). An overview of budget contingency calculation methods in construction industry. *Procedia Engineering*, 85, 52–60. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.10.528>
- Camara Colombiana de la Infraestructura. (2019). *Bitacora de la infraestructura*.
- de la Cruz, R., Gaston, L., y Loterszpil, M. (2018). *Colombia hacia un pais de altos ingresos con movilidad social*.
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE). (2019). *Boletín Técnico*.
- Eldosouky, I. A., Ibrahim, A. H., y Mohammed, H. E. D. (2014). Management of construction cost contingency covering upside and downside risks. *Alexandria Engineering Journal*, 53(4), 863–881. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2014.09.008>
- Fox, J. (2001). Multiple and Generalized Nonparametric Regression. *Journal of the Royal Statistical Society Series D (The Statistician)*, 51, 119–120. <https://doi.org/10.2307/3650402>
- Gómez, H. D., y Orobio, A. (2015). Effects of uncertainty on scheduling of highway construction projects. *Dyna*, 82(193), 155–164. <https://doi.org/10.15446/dyna.v82n193.47453>
- Groebner, David Shannon, P., y Fry, P. (2017). *Business Statistics: A Decision-Making Approach: Vol. 10th Editi.*
- Hartman, F. (2000). *A neural network approach to risk assessment and contingency allocation*.
- Lopez, J. C. (2008). *Guía básica para la simulación de Monte Carlo*.
- Manly, B. (2007). *Randomization, Bootstrap and Monte Carlo Methods in Biology* (Third Edit).
- Miñarro, A. (1998). *Estimacion no parametrica de la funcion de densidad*.
- Nassar, K. (2002). Cost contingency analysis for construction projects using spreadsheets. *Cost Engineering (Morgantown, West Virginia)*, 44(9), 26–31.
- Odeck, J. (2004). Cost overruns in road construction—what are their sizes and determinants? *Transport Policy*, 11(1), 43–53. [https://doi.org/10.1016/S0967-070X\(03\)00017-9](https://doi.org/10.1016/S0967-070X(03)00017-9)

- Palisade. (2016). *@RISK - Programa de complemento para el análisis y simulación de riesgos en Microsoft® Excel* (Vol. 7).
- Project Management Institute. (2017). A guide to the project management body of knowledge (PMBOK Guide). En *Guia de los Fundamentos para la dirección de Proyectos* (Sixth). www.pmi.org
- Scheaffer, R., Mulekar, M., y McClave, J. (2011). *Probability and statistics for engineers* (M. Julet (ed.); Fifth Edit). Stratton, Richard.
- Shrestha, K. K., y Shrestha, P. P. (2016). A Contingency Cost Estimation System for Road Maintenance Contracts. *Procedia Engineering*, 145, 128–135. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.04.030>
- Stephen, M., y Picken, D. (2000). Using risk analysis to determine construction project contingencies. *Journal of Construction Engineering and Management*, April, 130–136.
- Zamora, T. (2010). *Métodos de regresión no paramétrica en muestreo en poblaciones finitas*.