

Effects of uncertainty on scheduling of highway construction projects

Hernán Darío Gómez^a & Armando Orobio^b

^a Escuela de Ingeniería Civil y Geomatica, Universidad del Valle, Cali, Colombia. hernan.gomez@correounivalle.edu.co

^b Escuela de Ingeniería Civil y Geomatica, Universidad del Valle, Cali, Colombia. armando.oro bio@correounivalle.edu.co

Received: November 22th, 2014. Received in revised form: July 27th, 2015. Accepted: September 07th, 2015

Abstract

Time and cost overruns in highway construction are usual in Colombia. Contractors regularly fail in cost estimation and construction scheduling. An analysis of important factors on time and cost overruns in highway construction in southwest Colombia is presented in this paper. Forty highway construction projects were reviewed. Data from construction documents were collected to prepare a data base for probabilistic analysis. Data collected include scheduled construction time and cost, actual construction time and cost, and unexpected events which could have affected the construction process. Data were used in a probabilistic cost and schedule risk analysis to identify critical factors in construction time and cost overruns in the region. It was found that the activities that most affect the time and cost overruns are the construction of the granular base and the asphalt layer. The most common causes of construction overruns were found to be poor cost and duration estimates, rain, and materials supply problems.

Keywords: Highway Infrastructure; construction scheduling; time overrun; cost overrun

Efectos de la incertidumbre en la programación de proyectos de construcción de carreteras

Resumen

Las demoras y sobrecostos en la construcción de carreteras son cotidianos en Colombia. Se presentan imprecisiones en la estimación de los costos y en la programación de la construcción. Este artículo presenta un análisis de los factores determinantes en las demoras y sobrecostos en la construcción de carreteras en el sur occidente colombiano. Se revisaron 40 proyectos viales construidos en la región, la información revisada incluyó la programación de tiempo y costo, los datos de duraciones y costos reales de cada actividad, y las bitácoras de obra. Se realizó una simulación para evaluar probabilísticamente las prácticas de programación e identificar factores determinantes en las demoras y sobrecostos de las obras. Se encontró que las actividades que más inciden en las demoras y sobrecostos son la base granular y la carpeta asfáltica, las causas más comunes son las malas estimaciones de costos y duración, la lluvia y los problemas de suministro de materiales.

Palabras clave: Infraestructura vial; programación de obra; demoras; sobrecostos

1. Introducción

Realizar una buena gestión es importante para el éxito en la ejecución de cualquier proyecto. La identificación, análisis y planificación de riesgos permite la toma acciones de mitigación para reducir los impactos sobre los objetivos principales del proyecto; alcance, costo, tiempo y calidad.

Una buena programación posibilita la realización del

control necesario para ejecutar el proyecto dentro de un margen razonable de tiempo y costo. La mala estimación de la duración y costo de las actividades son riesgos en programación que pueden conllevar al fracaso de un proyecto.

Esta investigación se enfoca en el análisis de los efectos de la incertidumbre en tiempo y costo en la programación de proyectos de construcción de carreteras. El principal objetivo

es determinar qué tan sensible es este tipo de proyectos a la incertidumbre en la estimación del tiempo y costo de las actividades que lo componen. Se realiza una jerarquización de los efectos en el proyecto de las variaciones de las estimaciones de tiempo y costo de sus actividades. Para lo cual se efectúa un análisis cuantitativo del riesgo, aplicando simulación Monte Carlo sobre modelos de programación basados en el método de la ruta crítica (CPM). El comportamiento de las actividades se establece mediante distribuciones probabilísticas construidas a partir de datos históricos de proyectos similares, lo que permite cuantificar los efectos de la incertidumbre en las estimaciones y establecer la sensibilidad del costo y duración del proyecto a estimaciones realizadas durante la programación.

Adicional al análisis anterior, con base en la información recolectada de proyectos similares, se identifican algunas causas endógenas y exógenas que afectan las actividades que componen este tipo de proyectos.

2. Marco teórico

Las simulaciones permiten cuantificar los efectos de los riesgos en la programación de proyectos de construcción, posibilitando la evaluación de los efectos sobre la duración y costos de los proyectos de las estimaciones realizadas durante la etapa de programación. Estudios previos proponen utilizar la gestión de riesgos para una programación proactiva de proyectos de construcción [1,2]. Otros autores proponen un enfoque probabilístico para controlar el costo y tiempo en la ejecución de proyectos [3].

El método de Simulación Monte Carlo (SMC) se puede utilizar para realizar análisis de sensibilidad de las estimaciones realizadas durante la programación de los proyectos [4]. La SMC consiste en el desarrollo de un modelo lógico o matemático, cuyos datos de entrada son muestreados de manera aleatoria mediante funciones probabilísticas establecidas con un muestreo de datos reales, con el objetivo de vislumbrar el panorama de los diferentes resultados posibles del modelo. La SMC involucra los conceptos estadísticos del muestreo aleatorio con lo que se pueden realizar repetidas estimaciones con base a un modelo de programación CPM para analizar el espectro de posibilidades de la ejecución de un proyecto. Algunos investigadores han usado previamente SMC para evaluar riesgos en proyectos de construcción [5].

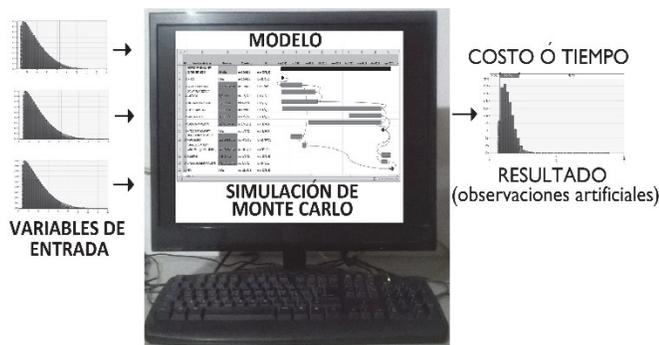


Figura 1. Esquema de simulación Monte Carlo. Fuente: Los autores

Tabla 1. Funciones estadística para definir actividades como variables.

Beta	BetaGeneral	Beta-Subjetiva
Binomial	Chi cuadrado	Cumulative
Discreta	Discreta Uniforme	Error Función
Erlang	Exponential	Extreme Value
Gamma	General	Geométrica
Histograma	Hypergeométrica	Inversa Gaussiana
EnteraUniforme	Logistic	Log-Logistic
Lognormal	Lognormal2	Negativa Binomial
Normal	Pareto	Pareto2
Pearson V	Pearson VI	PERT
Poisson	Rayleigh	Student's t
Triangular	Trigen	Uniforme
Weibull	Compuesta	

Fuente: [11]

La SMC se utiliza para aproximar una solución numérica a un problema estadístico cuando la solución analítica es demasiado compleja. Este método propone una variación ordenada de las entradas al modelo, con lo que se obtiene un número de observaciones artificiales (Fig. 1), utilizando la analogía entre la cantidad y la probabilidad de un evento, con relación al universo de posibilidades, como lo establece la ley de los grandes números que plantea que esta estimación converge al verdadero valor del volumen de conjuntos a medida que el número de resultados aumenta [6,7].

En el caso de la programación de proyectos, bajo los conceptos mencionados, el método de SMC plantea establecer las actividades que componen el proyecto como variables que siguen un patrón estadístico establecido, en función de datos extraídos de proyectos reales, los cuales son ajustados a distribuciones probabilísticas como las que se indican en Tabla 1 [8].

El método establece que los datos extraídos de los proyectos se usan para estimar los parámetros de las distribuciones probabilísticas que apliquen de acuerdo con las restricciones y condiciones asociadas a cada función, utilizando como herramienta de ajuste el método de los mínimos cuadrados. El mejor ajuste de los datos a una distribución probabilística es determinado con base en los siguientes criterios [9]:

- Criterio de Información Akaike (AIC)
- Criterio de Información Bayesiano (BIC)
- Chi-Cuadrada
- Kolmogorov-Smirnov (KS)
- Anderson-Darling (AD)

Se elige uno de los anteriores criterios para establecer la distribución probabilística que refleje mejor el comportamiento de los datos. Para cada variable los datos se ajustan a una distribución probabilística que es usada para seleccionar aleatoriamente datos de entrada al modelo durante la simulación [10]. Uno de los criterios más utilizados es el Akaike (AIC), el cual se establece como una medida de calidad para un conjunto de datos basada en la entropía de la información, donde el criterio de selección establece escoger la distribución con los valores más bajos de AIC [11].

Para el desarrollo de este tipo de simulaciones en proyectos de construcción, es necesario establecer los modelos de programación de costo y tiempo que permitan

desarrollar predicciones con sus correspondientes variables de entrada y de salida. Un aspecto clave de ésta metodología es que el costo total de un proyecto es igual a la suma de los costos directos e indirectos, y que los costos indirectos dependen ampliamente de la duración del proyecto.

Los costos directos son los costos asociados a la ejecución directa de cada actividad del proyecto, es decir que los costos directos totales son la sumatoria de los costos de ejecución de todas actividades del proyecto. Los costos indirectos son costos asociados a la administración del proyecto, estos costos no pueden ser asignados directamente a una actividad específica del proyecto, dado que se generan de manera transversal a lo largo de su ejecución, por lo general estos costos corresponden a salarios, impuestos, seguros, servicios, etc.

Otro concepto a tener en cuenta para realizar una simulación de este tipo de proyectos, es que el tiempo total del proyecto se estima con un modelo de programación, que se elabora en función de las interrelaciones de las actividades a ejecutar, las cuales definen la lógica de ejecución. En la industria de la construcción el modelo de programación es generalmente es elaborado por el método CPM.

El CPM desarrollado en el año 1957 en los Estados Unidos, permite la programación del proyecto, determinado la duración del mismo a partir de la duración de sus actividades y la interrelación existente entre ellas, siguiendo una secuencia lógica de acuerdo al proceso constructivo. En este método se establecen restricciones tales que la imposibilidad de iniciar una actividad antes de que sus predecesoras terminen o tengan un avance suficiente para garantizar que la actividad no presente obstrucciones durante su ejecución. Con esto se establece un orden cronológico de ejecución con hitos claves, donde la duración del proyecto es determinada por las actividades que componen la ruta crítica, que no tienen holguras que permitan retrasos sin afectar la fecha de terminación del proyecto.

Es importante indicar que los eventos que pueden afectar una obra pueden ser riesgos que impacten de manera negativa el desarrollo de las actividades en costo y duración, así como también pueden ser oportunidades que beneficien el desarrollo de la obra generando ahorros en tiempo y costo. Partiendo de lo anterior, es importante siempre identificarlos los riesgos con el fin de plantear estrategias para mitigar la ocurrencia de las amenazas y fomentar la ocurrencia de las oportunidades.

3. Metodología de la investigación

Para evaluar los efectos de la incertidumbre en tiempo y costo en la programación de proyectos de construcción de infraestructura vial, se realizó un análisis con base en un caso de estudio, que se modeló bajo el método de simulación Monte Carlo. A partir de la sensibilidad del modelo de programación CPM con respecto a sus datos de entrada, se establecieron los efectos de la incertidumbre de las estimaciones hechas para cada actividad en el costo y la duración final del proyecto. Permitiendo identificar actividades cuyas desviaciones en ejecución, respecto a lo programado, tienen mayor incidencia en el resultado final del proyecto. El análisis de la información adicional recolectada de la ejecución de los proyectos permitió establecer cuáles

fueron las causas de la ocurrencia de las desviaciones con respecto al programa de ejecución.

Para realizar la simulación se utilizó un software especializado en análisis de riesgos [11], que permite realizar las simulaciones Monte Carlo sobre modelos de programación CPM. Cada simulación comprendió 10.000 iteraciones y se desarrollaron tres modelaciones con las siguientes configuraciones:

- i. En el modelo de programación CPM construido para el caso de estudio, se definieron las duraciones de las actividades como variables inciertas que siguen distribuciones probabilísticas definidas a partir de datos históricos provenientes del análisis de 40 proyectos ejecutados en la región. La duración total del proyecto se estableció como la variable de salida de donde se interpretaron los efectos causados por los diferentes valores que toman las duraciones durante cada iteración en la simulación.
- ii. El modelo de costos se desarrolló en una hoja electrónica que contiene las mismas actividades del modelo CPM, considerando los costos unitarios como variables inciertas con distribuciones de probabilidad definidas a partir de datos de los 40 proyectos estudiados. El costo directo total del proyecto se estableció como la variable de salida para analizar los resultados generados por las iteraciones de la simulación.
- iii. Similar a la simulación anterior pero adicionando los costos administrativos al modelo de costo directos. Los costos administrativos se agregaron como una variable dependiente de la duración del proyecto. Los costos totales, conformados por la suma de los costos directos más los costos administrativos, se definieron como la variable de salida para interpretar los resultados de las iteraciones de la simulación.

Con estas simulaciones fue posible identificar varios elementos que inciden de manera importante en el incremento del costo y tiempo del proyecto. Adicionalmente con base en los datos recolectados, se establecieron algunas de las causas que afectan las actividades en costo y duración, registrando la frecuencia de ocurrencia de los eventos y el promedio de magnitud de estos cuando se presenta.

4. Recolección de información

Se revisaron 40 proyectos de construcción de infraestructura vial, se recolectaron documentos tales 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. El análisis de la información se centró en los costos de las actividades y su duración en el desarrollo de las obras.

Debido al método que actualmente se utiliza para la elaboración de los presupuestos, en donde una actividad puede estar disgregada en varios ítem que componen el presupuesto con unidades de medida diferente, fue necesario realizar la reagrupación de los costos unitarios en función de las actividades que se establecieron en el modelo CPM. En la Tabla 2 se muestran las consideraciones contempladas para consolidar los datos de los presupuestos de los proyectos utilizados para conformar la base de datos.

Tabla 2.

Consideraciones para ajuste de los presupuestos

Actividad	Und	Descripción del Costo asociado
Cajeo	m3	Excavación sin clasificar a máquina, incluye retiro y movilización de maquinaria
Conformación de la sub-rasante	m2	Conformación de la calzada existente
Sub-base granular	m3	Suministro e instalación de Sub-base granular, incluye acarreo de la planta a la obra y movilización de maquinaria.
Base granular	m3	Suministro e instalación de Base granular, incluye acarreo de la planta a la obra e incluye movilización de maquinaria.
Imprimación	m2	Riego de imprimación con emulsión asfáltica.
Carpeta asfáltica	m3	Suministro e instalación de mezcla densa en caliente tipo MDC, incluye acarreo de la planta a la obra y movilización de maquinaria.
Cunetas en concreto	m	Suministro e instalación de Concreto clase D: 3000 psi para canaletas, incluye excavación y formaleta.
Encoles y descoles	m3	Suministro e instalación de Concreto clase D: 3000 psi para encoles y descoles de tuberías de desagüe, incluye 65 kg de acero por m3 de concreto, excavación y formaleta.
Tubería de concreto reforzado de 900 mm	m	Suministro e instalación Tubería de concreto reforzado de 900 mm de diámetro interior, incluye transporte, colocación de 0,48 m3 de lecho de arena por metro lineal de tubería, 1,8 m3 de excavación a máquina por metro lineal de tubería y 0,6 m3 de relleno importado por metro lineal de tubería.
Líneas de demarcación con pintura en frío	m	Líneas de demarcación con pintura en frío

Fuente: Los autores

Los datos de costos de años anteriores fueron actualizados utilizando los índices de Costos de la Construcción Pesada (ICCP) obtenidos de información estadística del DANE.

5. Selección del proyecto

El caso de estudio seleccionado fue la rehabilitación de un tramo de la vía Jamundí – Timba, en el Departamento del Valle del Cauca, Colombia. La obra se ejecutó entre de septiembre de 2011 y mayo de 2012, con un costo total de \$7.569'301.751, distribuido de la siguiente manera:

- Costo directo: \$5.756'123.005.
- Costos administrativos: \$1.813'178.746 (Incluidos utilidades, imprevistos e impuestos).
- Duración programada 5 meses (150 días).
- Duración real 6.5 meses (194 días).

En el análisis solo se consideraron las actividades comunes en el caso de estudio y los proyectos revisados para efectos de la construcción de las distribuciones de probabilidad. Las demás actividades se consideraron como parámetros fijos debido a que no se encontró información suficiente para construir sus distribuciones de probabilidad. Las actividades incluidas en el análisis se muestran en la

Tabla 3.

Presupuest

o de actividades del caso de estudio (costos directos).

Descripción	Und	Cant.	V.Und	V. total
Cajeo	m3	5.459	18.388	100.374.873
Conformación: sub-rasante	m2	68.130	1.662	113.211.110
Sub-base	m3	4.917	87.870	432.054.884
Base	m3	13.639	92.251	1.258.216.319
Imprimación	m2	99.760	1.440	143.654.818
Carpeta asfáltica	m3	6.615	413.055	2.732.357.266
Cunetas en concreto	m	1.919	34.822	66.815.634
Encoles y descoles	m3	45,9	618.256	28.377.950
Tubería de concreto reforzado de 900 mm	m	137	361.701	49.589.167
Líneas de demarcación con pintura en frío	m	17.867	1.780	31.803.260
Total				4.956.455.281

Fuente: Los autores

Tabla 3 y corresponden al 86,11 % del costo directo del proyecto. Los valores de la tabla son los costos directos reales tomados de las actas de liquidación del proyecto.

6. Desarrollo de la simulación

La modelación del proyecto se realizó en tres configuraciones como se explicó anteriormente, las configuraciones se realizaron en función de: a) El tiempo de ejecución, b) El costo directo y c) El costo total.

6.1. Simulación del tiempo de ejecución

Este primer modelo establece un programa de ejecución del caso de estudio que cumple con un orden lógico de ejecución de actividades (secuencias y precedencias) y de las restricciones del proceso constructivo inferidas de la bitácora de obra.

En la Tabla 4 se muestra la configuración del modelo a ejecutar, donde se establecen como variables inciertas de entrada las duraciones de las actividades, cuyos valores X_i

Tabla 4.

Configuración del modelo CPM

Id	Actividad	Duración (variable)	Predecesora
1	Proyecto Timba Rio Claro Tramo 1	SALIDA	
2	Inicio	0 días	
3	Excavación Cajeo	X_1	2
4	Conformación De Calzada	X_2	3FF+1 día;2FC+1 día
5	Sub-Base Granular	X_3	4FF+1 día;2FC+2 días
6	Base Granular	X_4	5FF+1 día;2FC+3 días
7	Imprimación	X_5	8CC;9FF-1 día
8	Carpeta Asfáltica	X_6	6FF+1 día;2FC+4 días
9	Fin Carpeta (Hito)	0 días	8
10	Tubería De Concreto Reforzado	X_9	3FF;2CC
11	Cajas de Encole y Cabezales (Conc.3000psi)	X_8	10
12	Cunetas	X_7	9
13	Líneas De Demarcación	X_{10}	9
14	Fin	0 días	11;13;12

Fuente: Los autores

Tabla 5. Configuración del modelo de costo directo

Descripción	Und	Cant.	V.Und inciertos	V. Total
Cajeo 2	m3	5.459	Y ₁	
Conformación de sub-rasante 2	m2	68.130	Y ₂	
Sub-base 2	m3	4.917	Y ₃	
Base 2	m3	13.639	Y ₄	
Imprimación 2	m2	99.760	Y ₅	
Carpeta asfáltica 2	m3	6.615	Y ₆	
Cunetas en concreto 2	m	1.919	Y ₉	
Encoles y descoles 2	m3	45,9	Y ₈	
Tubería de concreto reforzado de 900 mm 2	m	137	Y ₇	
Líneas de demarcación con pintura en frio 2	m	17.867	Y ₁₀	
Total costo directos				Salida 

Fuente: Los autores

están sujetos a la distribución probabilística de la duración de cada actividad. La duración total del proyecto se estableció como la variable de salida. La cual tiene una distribución probabilística resultante de los diferentes valores que toman las variables de entrada durante las iteraciones.

6.2. Simulación con costos directos

El modelo de simulación de costos directos se estableció con base en el presupuesto de ejecución del caso de estudio, el cual contiene todas las actividades contempladas en el cronograma de obra y en el acta de liquidación.

En la Tabla 5 se muestra la configuración del modelo a ejecutar, donde se establecen como variables inciertas de entrada los costos unitarios Y_i de las actividades, sujetos a distribuciones probabilísticas construidas con los datos recolectados. El costo total directo del proyecto se estableció como la variable de salida.

6.3. Simulación de costos totales

El modelo de simulación de costos totales se muestra en la Tabla 6, se establece un presupuesto de ejecución para el caso de estudio, que contiene todas las actividades contempladas en el programa de obra. Para considerar los efectos generados por los costos administrativos en función del tiempo se hizo necesario calcular los costos administrativos diarios.

Los costos unitarios de las actividades se establecieron como variables inciertas de entrada, las cuales están sujetas a unas funciones de probabilidad. La duración del proyecto en este modelo se convierte en una variable parametrizada por los resultados de la modelación del tiempo, que multiplicado con el costo unitario diario de la administración genera la variable del costo administrativo. El costo total del proyecto se estableció como la variable de salida.

7. Análisis de los resultados

7.1. Análisis del tiempo de ejecución de la obra

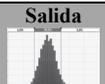
La distribución obtenida para la duración del proyecto se muestra en la Fig. 2, la distribución presenta un sesgo hacia

la izquierda con un 90% de las posibles duraciones del proyecto entre 142 y 274 días. La curva de probabilidad acumula (Fig. 3) indica que la probabilidad de que el proyecto tenga una duración inferior a 142 días es del orden del 1%, mientras que la probabilidad concluir el proyecto antes de 274 días supera el 95%.

Dada la variabilidad de los datos se puede establecer un nivel de riesgo al momento de definir una duración estimada del proyecto que garantice una contingencia [12]. Si se selecciona una probabilidad del 80% de cumplir con la duración del proyecto, la duración sería de 220 días. Lo que implicaría un riesgo del 20 % de superar esta duración. En otras palabras, si se define una duración de 220 días (cerca de 32 semanas), se tendría una probabilidad del 80 % de entregar la obra a tiempo.

Los datos muestran que era muy poco probable terminar la obra con la duración con la que fue programada inicialmente de 150 días. La Fig. 3 indica que la probabilidad de terminar la obra con una duración igual o inferior a 150 días era inferior al 10%.

Tabla 6. Configuración del modelo de costo directo más administración.

Descripción	Und	Cant.	V.Und inciertos	V. total
Cajeo 2	m3	5459	Y ₁	
Conformación de sub-rasante 2	m2	68130	Y ₂	
Sub-base 2	m3	4917	Y ₃	
Base 2	m3	13639	Y ₄	
Imprimación 2	m2	99760	Y ₅	
Carpeta asfáltica 2	m3	6615	Y ₆	
Cunetas en concreto 2	m	1919	Y ₉	
Encoles y descoles 2	m3	45,9	Y ₈	
Tubería de concreto reforzado de 900 mm 2	m	137	Y ₇	
Líneas de demarcación con pintura en frio 2	m	17867	Y ₁₀	
Total costo directos				
Administrativos	Duración proyecto Z1	Costo unitario día	Costos adminis.	
		2.395.437,50		
Total total				Salida 

Fuente: Los autores

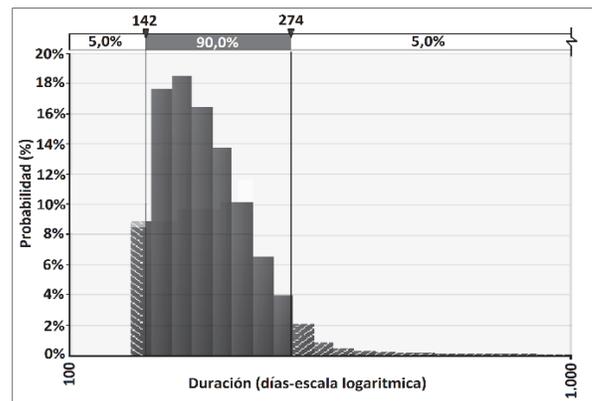


Figura 2 Probabilidad de ocurrencia la duración del proyecto. Fuente: Los autores.

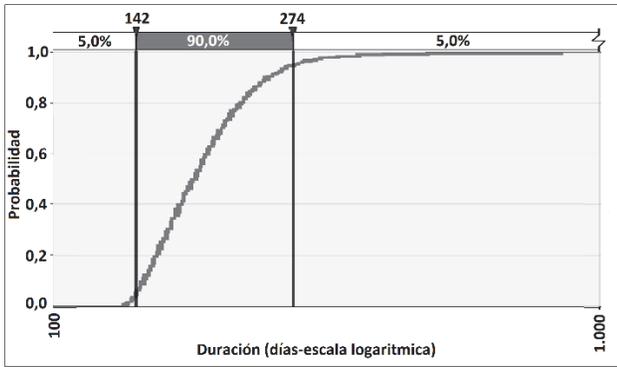


Figura 3. Probabilidad de ocurrencia acumulada del proyecto.
Fuente: Los autores.

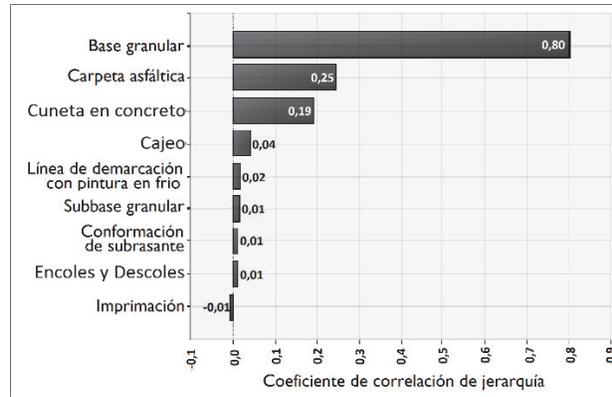


Figura 5. Coeficiente de correlación jerárquica de duración del proyecto.
Fuente: Los autores

En la Fig. 4 se muestra el análisis de sensibilidad de las actividades con respecto a la duración del proyecto. Tomando como referencia la línea base de 194 días, que corresponde a la duración más probable. En la figura se establecen los límites superiores e inferiores del rango de duraciones posibles del proyecto que resultarían del buen o mal desempeño en ejecución de cada actividad de la obra.

La Fig. 4 muestra que las actividades con mayor incidencia en la duración del proyecto son la base granular, la carpeta asfáltica, el cajeo y las cunetas en concreto. Esto es debido a las grandes cantidades de obra a ejecutar de estas actividades y a la lógica del modelo CPM desarrollado durante la planeación de la obra. Un buen desempeño en la ejecución de la base granular podría haber reducido la duración del proyecto a casi 161 días, disminuyendo los efectos del incumplimiento en la terminación oportuna del proyecto. Por otro lado un mal desempeño en la ejecución de esta actividad podría haber incrementado la duración hasta cerca de 261 días. Las otras actividades muestran rangos inferiores, pero la eficiencia del constructor en cualquiera de ellas tendría el efecto en la duración del proyecto cuantificado en la gráfica.

En la Fig. 5 se presentan los coeficientes de correlación jerárquica de las actividades con respecto a la duración del proyecto. Entre más alto sea el valor del coeficiente más sensible es la duración del proyecto al desempeño en la ejecución de la actividad. La figura muestra que las actividades

que más incidencia tienen en la duración del proyecto son; la base granular, la carpeta asfáltica y las cunetas en concreto. Lo cual es consistente con los efectos mostrados en la Fig. 4. Sería conveniente establecer contingencias en tiempo durante la programación de actividades con estas características, de tal manera que los efectos en la duración del proyecto, de problemas en su ejecución puedan mitigarse. Es importante aclarar que el orden jerárquico de la correlación no es exactamente el mismo que el del análisis de sensibilidad debido a que la correlación depende más de la configuración del modelo de red y de la razón con la que cada variable varía.

La probabilidad que tiene cada actividad de estar en la ruta crítica del proyecto con base a los datos generados por la simulación Monte Carlo, se analiza mediante el Gantt Probabilístico que se resume en la Tabla 7. Las actividades con más probabilidad de estar en la ruta crítica son la carpeta asfáltica, la base granular y las cunetas en concreto. Esto es debido a la configuración del modelo CPM donde la ruta crítica principal está claramente definida por la cadena entre el hito de inicio, la base granular, la carpeta asfáltica y las cunetas en concreto. Igualmente con la incidencia de las mayores cantidades de obra la base granular y la carpeta asfáltica tienen en el caso de estudio. La sub-base granular, el cajeo y la conformación de sub-rasante no están dentro de la ruta crítica debido principalmente a las menores cantidades

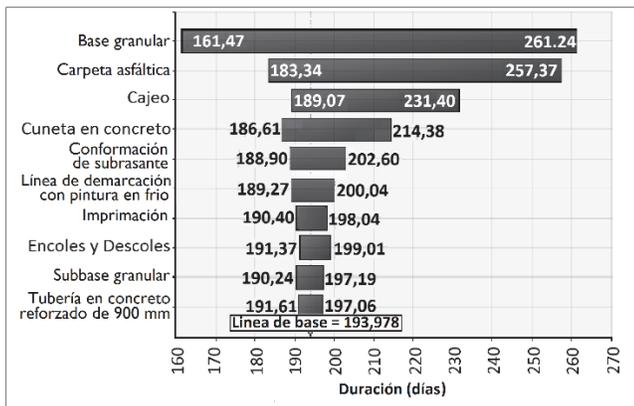


Figura 4. Sensibilidad de las actividades en la duración del proyecto.
Fuente: Los autores.

Tabla 7. Análisis de Gantt Probabilístico

Nombre de tarea	Índice crítico%
Proyecto timba rio claro tramo 1	
Inicio	100%
Excavación cajeo	2%
Conformación de calzada (sub-rasante)	2%
Sub-base granular	2%
Base granular	86%
Imprimación	0%
Carpeta asfáltica	100%
Hito de fin carpeta	100%
Tubería de concreto reforzado	0%
Cajas de encole y cabezales	0%
Cunetas de concreto	73%
Líneas de demarcación	27%
Fin	100%

Fuente: Los autores.

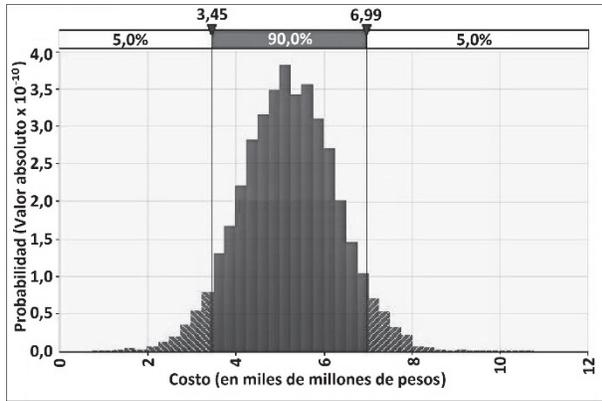


Figura 6. Probabilidad de ocurrencia del costo directo.

Fuente: Los autores

que poseen dentro en el caso de estudio. Aunque la base granular depende de estas actividades para poder ser terminada, estas pueden desarrollarse en el transcurso de la obra de manera intermitente siempre garantizando avance suficiente para que la actividad de la base granular tenga continuidad durante el proceso constructivo.

Se puede observar que los resultados del Gantt probabilístico son consistentes con el análisis de correlación de la Fig. 4.

7.2. Análisis del costo directo de la obra

Los resultados obtenidos de la simulación del costo directo se muestran en la Fig. 6. El resultado de la simulación tuvo un costo directo promedio de \$ 5.213.042.817 que corresponde al costo directo más probable para el caso de estudio. La distribución presenta una mediana de \$ 5.207.317.306 que indica un ligero sesgo positivo de los datos.

En la Fig. 7 se muestran los resultados acumulados del costo directo del proyecto versus su probabilidad de ocurrencia. Si para definir una contingencia se tomará una probabilidad de ocurrencia del 80%, el costo probable sería de \$ 6.111.745.013, que comparado con el costo directo real que tuvo el proyecto de \$5.756'123.005, difiere tan solo en \$

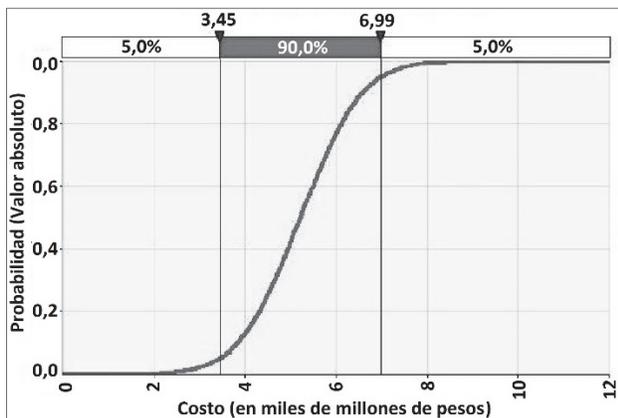


Figura 7. Probabilidad de ocurrencia acumulada del costo directo.

Fuente: Los autores.

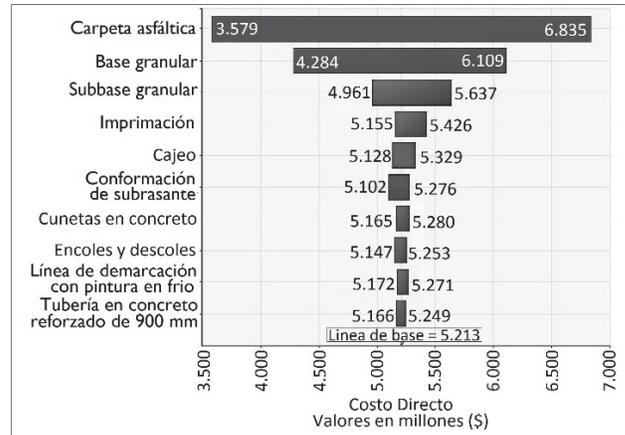


Figura 8. Análisis de sensibilidad del costo directo.

Fuente: Los autores.

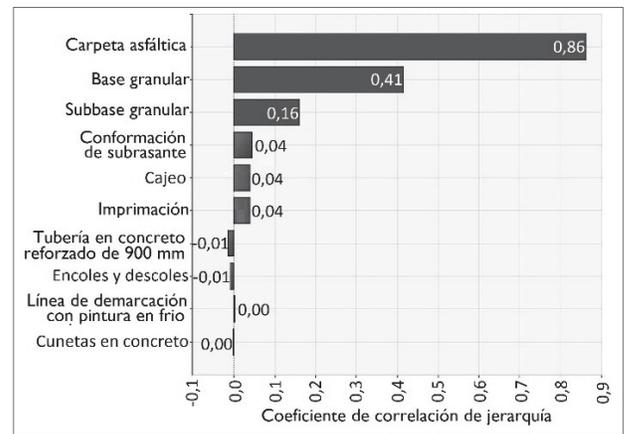


Figura 9. Coeficiente de correlación jerárquica del costo directo.

Fuente: Los autores.

350.622.008, que sería un buen referente en nuestro medio. Sin embargo, un mejor desempeño en la ejecución de la obra hubiera permitido ahorros del orden de los \$ 543.080.188.

La Fig. 8 indica que las actividades con mayor incidencia en costo directo del proyecto son la carpeta asfáltica, la base granular y la sub-base granular, lo cual se explica por el alto costo unitario de estas actividades.

En la Fig. 9 se establecen los coeficientes de correlación del costo de las actividades con respecto al costo directo total del proyecto. La grafica confirma la alta incidencia que tienen en el costo directo las actividades carpeta asfáltica, base granular y sub-base. Lo que le indicaría al constructor poner especial cuidado en el control de la ejecución de estas actividades para tener mejores resultados en la gestión de costos del proyecto, con posibilidad de lograr costos directos finales incluso inferiores al costo más probable definido como línea base en la Fig. 8.

7.3. Análisis del costo total de la obra

La Fig. 10 muestra la distribución del costo total con la probabilidad de ocurrencia. La simulación indica que el valor

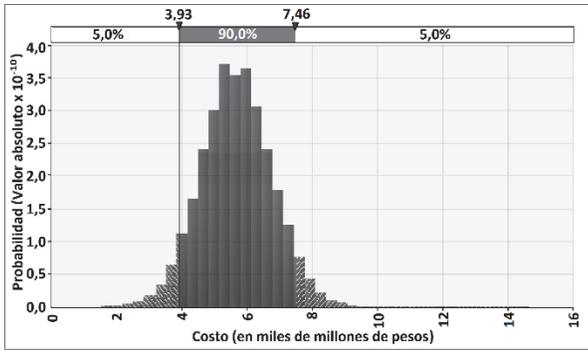


Figura 10. Probabilidad de ocurrencia costo directo más administración.
Fuente: Los autores.

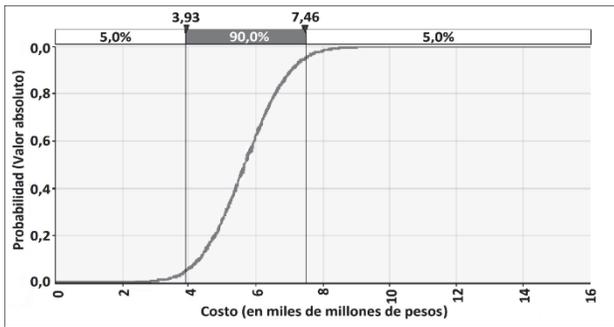


Figura 11. Probabilidad acumulada de duración del proyecto.
Fuente: Los autores.

más probable es \$ 5.675.449.753. La similitud de la mediana de \$ 5.667.515.758 con respecto a la media, es indicativo de una distribución casi simétrica.

La curva de probabilidad acumulada del costo directo (Fig. 11) muestra que para una probabilidad de ocurrencia del 80%, el costo directo total asciende a \$6.577.027.996, que comparado con el costo total más probable tiene una diferencia de \$ 901.578.243 lo que es bastante significativo.

Si se compara el valor de \$6.577.027.996 con el costo real que tuvo el proyecto \$7.569'301.751, la diferencia de \$ 992.273.755 es muy significativa. Lo que hace evidente que el buen desempeño en la ejecución del proyecto tiene efectos importantes en los costos totales de la obra, incluso mayor que cuando se analizan únicamente los costos directos. Es claro que los costos administrativos son una función de la duración de la obra y los beneficios de terminar el proyecto más pronto son evidentes.

En la Fig. 12 se muestra la sensibilidad de las actividades con respecto al costo total del proyecto, se establece el costo más probable como línea base. Las actividades con más incidencia en el costo total del proyecto son la carpeta asfáltica, la base granular y la sub-base.

Adicionalmente se evaluó el efecto de los costos administrativos que ocupan la cuarta posición en sensibilidad sobre los costos totales del proyecto. Se observa que los costos administrativos, que están en función del tiempo total de ejecución del proyecto, son un factor que afecta de manera significativa el costo total de la obra.

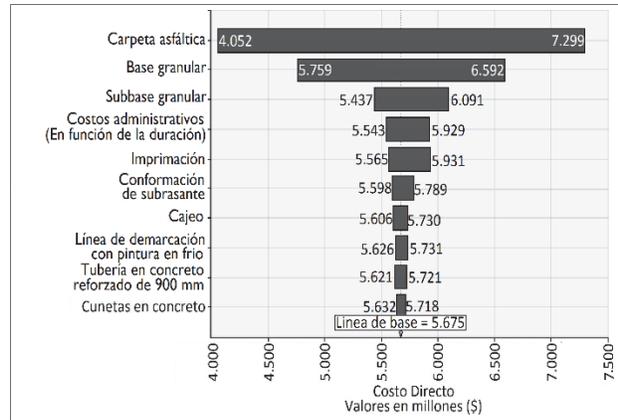


Figura 12. Sensibilidad del costo total a las actividades.
Fuente: Los autores.

8. Análisis de las causas

Para el análisis de causas se utilizaron los registros históricos recolectados para el desarrollo de los modelos para identificar por medio de las bitácoras, documentos de obra y actas, 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 se tiene control y eventos endógenos aquellos que pueden ser controlados por el constructor [13,14].

- Lluvias: Son evento meteorológico catalogado como una causa exógena que genera retraso en las actividades analizadas.
- Daños mecánicos: Este evento se refiere a los daños en los equipos que se utilizan en el desarrollo de las actividades, son catalogados como una causa endógena de retraso en la ejecución de las actividades.
- Especificaciones Técnicas: Este evento está asociado a los cambios de especificaciones técnicas en el desarrollo de una actividad, como por ejemplo un cambio inesperado en el trazado de la vía, un ajuste al diseño de mezcla asfáltica o problemas de calidad en los materiales. Este evento es catalogado como una causa endógena de retraso en la ejecución de la actividad.
- Falta de personal: Este evento se refiere a la falta de personal que se van a desarrollar las actividades, es catalogado como una causa endógena de retraso en la ejecución de la actividad.
- Falta de suministro: Este evento se refiere a la falta del suministro de material que se va a utilizar en las actividades, catalogado como una causa endógena de retraso en la ejecución de la actividad.

De las 5 principales causas identificadas, 4 son eventos endógenos que pueden ser controlados por el constructor con una buena gestión del proyecto. Lo que representaría un mejor desempeño en la ejecución, con la posibilidad acercar la ejecución a las duraciones y costos menores.

Tabla 8.
Matriz de causas que afectan la duración de las actividades

Actividad	causa de retrasos				
	Lluvia	Daño mecánico.	Especif. Técnicas	Falta de personal	Falta de suministro
Cajeo	X	X	X		
Base granular	X	X	X		
Carpeta asfáltica	X	X	X	X	X
Conformación de subrasante	X		X		
Cuneta de concreto	X			X	
Encofe y descofe (concreto)	X				
Imprimación	X				
Líneas de demarcación con pintura en frío	X				
Sub-Base	X	X	X		
Tubería de concreto reforzado de 900 mm	X				

Fuente: Los autores.

Con la información obtenida de los registros de las bitácoras de los proyectos estudiados, se pudo determinar que las causas anteriormente identificadas afectan principalmente las actividades de cajeo, base granular, sub-base granular y carpeta asfáltica (Tabla 8). Estas tres últimas identificadas en la simulación como las más sensibles con respecto al tiempo y costo de proyecto. Al tener causas en su mayoría endógenas, los problemas en el proyecto pueden ser mitigados por el constructor con una buena gestión del proyecto.

Otras causas que tienen alta incidencia en los costos totales de la construcción fueron las siguientes:

- Transporte de equipos: Incremento de costos de las actividades por el transporte de la maquinaria pesada al lugar de ejecución del proyecto.
- Acarreos: Incremento del costo de los insumos por efecto del transporte de material desde la planta de producción hasta la obra, principalmente para las actividades de base granular, sub-base y carpeta asfáltica.
- Retiro de material: Incremento del costo del retiro del material de excavación por el efecto de la distancia entre el botadero y la obra durante la ejecución del cajeo.

9. Comparativo entre los resultados de la simulación y los resultados reales de la obra

Cuando se comparan los resultados de la simulación, con los resultados reales de construcción del caso de estudio, se tiene que la duración real que tuvo el proyecto, de 194 días, es mucho mayor que la duración inicialmente programada de 150 días. Como se mostró anteriormente en la simulación, una duración de 150 días tenía menos del 10% de

probabilidad de éxito, lo que explica en gran parte la terminación tardía del proyecto. En lo referente al costo total del proyecto (Figs. 11 y 12) la probabilidad de que el costo del proyecto fuera inferior al costo real de \$7.569'301.751 supera el 90%. De hecho el costo real supera ampliamente el costo más probable de \$ 5.675.449.753. La comparación evidencia una construcción con pobre desempeño en costo y pobre desempeño en duración, situación que pudo evitarse con un buen proceso de gestión del proyecto.

10. Conclusiones

Los datos del presente estudio indican que los efectos de la incertidumbre en la programación de los proyectos de construcción de infraestructura vial pueden llegar a ser muy significativos, tanto en costo como en la duración final de las obras. Se debe tener un especial cuidado en la programación inicial, en especial en la estimación de las duraciones y el costo de las actividades del proyecto.

Se encontró que el caso de estudio había sido programado inicialmente con una duración con muy bajas probabilidades de cumplir, lo cual resultó en demoras y tuvo alta incidencia en el incremento del costo final del proyecto.

Las actividades más sensibles en relación con la duración para el caso estudiado fueron la base granular, la carpeta asfáltica, el cajeo y las cunetas en concreto. Los problemas en la ejecución de estas actividades producen las mayores variaciones en la duración total del proyecto. Lo que implica que estas actividades requieren especial atención en el proceso de ejecución con el fin de minimizar demoras en la finalización del proyecto.

La carpeta asfáltica, la base granular y las cunetas en concreto presentaron el mayor índice crítico con 100%, 86% y 73% respectivamente, lo cual indica que estas tienden a permanecer en la ruta crítica dentro de los diversos escenarios planteados en la simulación, lo que confirma la importancia del seguimiento que se le debe hacer a estas actividades.

En cuanto al costo directo, las actividades con mayor influencia en su variación fueron la carpeta asfáltica, la base granular y la sub-base granular. Estas actividades requieren un estricto control de costos durante su ejecución con el fin de limitar sobrecostos considerables. Estas mismas actividades tienen los mayores efectos en los costos administrativos, considerando que estos aumentan con la mayor duración del proyecto.

Establecidos los impactos que pueden generar estas variables en el caso de estudio, es importante establecer las posibles contingencias con el fin de reducir el nivel de riesgo que se quiere asumir a la hora de ejecutar un proyecto. Para el caso de estudio se observó que una recomendación de establecer una probabilidad de ocurrencia del 80% hubiera sido adecuada tanto en la duración como en el costo total del proyecto.

En relación con las causas de las demoras y sobre costos, se pudo establecer que la mayoría de estas causas son endógenas, es decir están dentro de las posibilidades de control del constructor. Las principales causas endógenas identificadas fueron los daños mecánicos, los problemas con especificaciones técnicas, la falta de personal y la falta de suministro. La lluvia fue la única causa exógena identificada.

La lluvia es la principal causa de demoras en este tipo de obras, afectando actividades de cajeo, base granular, sub-base y carpeta asfáltica, las cuales fueron las actividades de mayor coeficiente de categorización jerárquica, lo que implica que un análisis juicioso de las condiciones climáticas del sitio del proyecto resultaría muy beneficioso en la etapa de programación.

Se identificó alta incidencia del costo de acarreo de materiales para el caso de las actividades de base granular, sub-base granular y la carpeta asfáltica. Los acarreos se identificaron como una causa importante en el incremento del costo final de proyecto, debido a que el costo del transporte de los insumos está en función de la distancia. Similar situación se identificó para el acarreo de materiales de desecho al botadero.

Referencias

- [1] Schatteman, D., Herroelen, W., Van de Vonder, S., and Boone A., Methodology for integrated risk management and proactive scheduling of construction projects. *Journal of Construction Engineering and Management* 134 (11), pp. 885-893. 2008. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9364(2008)134:11(885)
- [2] Martínez, G., Moreno, B. y Rubio, M.delC., Gestión del riesgo en proyectos de ingeniería. El caso del campus universitario PTS. Universidad de Granada (España). *DYNA rev.fac.nac.minas, Medellín*, 79 (173), pp. 7-14, 2012.
- [3] Barraza, G.A. and Bueno, R.A., Probabilistic control of project performance using control limit curves. *Journal of Construction Engineering and Management* 133 (12), pp. 957-965. 2007. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9364\(2007\)133:12\(957\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9364(2007)133:12(957))
- [4] Flanagan, R. and Norman, G., *Risk management and construction*. 2. London: Blackwell Science, 2011.
- [5] Al-Bahar, J.F. and Crandall, K.C., Systematic risk management approach for construction projects. *Journal of Construction Engineering and Management* 116 (3), pp. 533-546. 1990. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9364(1990)116:3(533)
- [6] López, J.C., *Guía básica para la simulación de Monte Carlo*. 1^{ra} ed Madrid. AENOR, 2008.
- [7] Haldar, A. and Sankaran, M., *Probability, reliability, and statistical methods in engineering design*. 1^{ed}, New York. John Wiley & Sons, 2000.
- [8] Barraza, G.A., Back, W.E. and Mata, F., Probabilistic forecasting of project performance using stochastic S curves. *Journal of Construction Engineering and Management* 130 (1), pp. 25-32. 2004. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9364(2004)130:1(25)
- [9] Ang, A.H.S y Tang, W.H., *Probability concepts in engineering: Emphasis on applications to civil and environmental engineering*. 2nd ed. New York: Wiley, 2006.
- [10] Nguyen, L., Phan, D. and Tang, L., Simulating construction duration for multistory buildings with controlling activities. *Journal of Construction Engineering and Management* 139 (8), pp. 951-959. 2013. DOI: 10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000677
- [11] Corporation, Palisade. Risk 6.1. Integrated Excel program that performs risk analysis using Monte Carlo simulation. 2013.
- [12] Vose, D., *Risk analysis: A quantitative guide*. New York. John Wiley & Sons, 2008.
- [13] Olsen, T.E. and Osmundsen P., Sharing of endogenous risk in construction. *Journal of Economic Behavior & Organization* 58 (4), PP. 511-526. 2005. DOI:10.1016/J.JEBO.2003.09.019
- [14] Luu, V.T., Kim S.Y., Nguyen, V.T. and Ogunlana S.O., Quantifying schedule risk in construction projects using Bayesian belief networks. *International Journal of Project Management*, 27 (1), pp. 39-50. 2009. DOI: 10.1016/J.IJPROMAN.2008.03.003

A. Orobio, es PhD. en Ing. Civil de West Virginia University, USA. Ing. Civil y MSc. en Infraestructura Vial de la Universidad del Cauca, Colombia. Profesor titular de la Escuela de Ingeniería Civil y Geomática de la Universidad del Valle, Cali, Colombia.
ORCID: 0000-0001-7166-3061|

H.D. Gómez, es Ing. Civil y MSc. en Ingeniería Civil de la Universidad del Valle, Cali, Colombia. Es gerente de proyectos de construcción en la empresa Construcciones Arquitectónicas Ingeniería S.A.S. de Cali, Colombia.
ORCID: 0000-0002-5602-4648



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

SEDE MEDELLÍN
FACULTAD DE MINAS

Área Curricular de Ingeniería Civil

Oferta de Posgrados

Especialización en Vías y Transportes
Especialización en Estructuras
Maestría en Ingeniería - Infraestructura y Sistemas
de Transporte
Maestría en Ingeniería - Geotecnia
Doctorado en Ingeniería - Ingeniería Civil

Mayor información:

E-mail: asisacic_med@unal.edu.co
Teléfono: (57-4) 425 5172