

ANÁLISIS CUANTITATIVO DE LOS RIESGOS DE PROGRAMA EN UN  
PROYECTO DE OBRA CIVIL DE LA UNIVERSIDAD DEL VALLE

JUAN CAMILO PAZ ROA  
DAVID ROZENBOIM SEPÚLVEDA



UNIVERSIDAD DEL VALLE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL  
SANTIAGO DE CALI, COLOMBIA  
2014

ANÁLISIS CUANTITATIVO DE LOS RIESGOS DE PROGRAMA DE UN PROYECTO  
DE OBRA CIVIL DE LA UNIVERSIDAD DEL VALLE

JUAN CAMILO PAZ ROA  
DAVID ROZENBOIM SEPÚLVEDA

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Industrial

Director  
Msc. Álvaro Julio Cuadros



UNIVERSIDAD DEL VALLE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL  
SANTIAGO DE CALI, COLOMBIA  
2014

NOTA DE ACEPTACIÓN

---

---

---

**Jurado**

---

**Jurado**

## **AGRADECIMIENTOS**

A mis padres, por su constante apoyo. A mi compañero de tesis por su tolerancia, amistad y fortaleza para el cumplimiento de esta meta. A Sandra Cano, por su amistad, colaboración e interés por este proyecto.

*Juan Camilo Paz Roa*

A mi madre y abuela por su incondicional apoyo, a mi padre y hermanos por sus enseñanzas y voz de aliento. A mi compañero de tesis por su valiosa amistad, tenacidad y sabiduría. A Tayná Ramos por su inconmensurable cariño y apreciada ayuda. A Sandra Cano, por su interés y colaboración.

*David Rozenboim Sepúlveda*

A nuestro director Álvaro Julio Cuadros por su constante apoyo y orientación para el desarrollo del trabajo de grado. A Sandra Cano por su orientación y por brindar sus conocimientos y apoyo para la obtención de la información necesaria para la culminación del proyecto. A el grupo de expertos por su disposición para brindar la información necesaria para desarrollar el proyecto de grado. A nuestra familia, compañeros y amigos que nos apoyaron y animaron a el cumplimiento de esta meta.

*Los Autores*

## TABLA DE CONTENIDO

|                                                                                                                                                           |           |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>INTRODUCCIÓN .....</b>                                                                                                                                 | <b>1</b>  |
| <b>1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....</b>                                                                                                                 | <b>3</b>  |
| <b>2. OBJETIVOS .....</b>                                                                                                                                 | <b>7</b>  |
| 2.1. OBJETIVO GENERAL .....                                                                                                                               | 7         |
| 2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....                                                                                                                          | 7         |
| <b>3. ASPECTOS GENERALES DEL ANÁLISIS CUANTITATIVO DE RIESGOS DE PROGRAMA EN PROYECTOS DE OBRA CIVIL.....</b>                                             | <b>8</b>  |
| 3.1. LOS PROYECTOS Y LA GESTIÓN DEL RIESGO.....                                                                                                           | 8         |
| 3.1.1. <i>Planificación de la gestión del riesgo</i> .....                                                                                                | 8         |
| 3.1.2. <i>Identificación de riesgos</i> .....                                                                                                             | 9         |
| 3.1.3. <i>Análisis cualitativo de riesgos</i> .....                                                                                                       | 9         |
| 3.1.4. <i>Análisis cuantitativo de riesgos</i> .....                                                                                                      | 9         |
| 3.1.5. <i>Planes de respuesta</i> .....                                                                                                                   | 9         |
| 3.1.6. <i>Control y monitoreo de riesgos</i> .....                                                                                                        | 10        |
| 3.2. PROGRAMACIÓN APLICADA EN PROYECTOS .....                                                                                                             | 10        |
| 3.3. ANÁLISIS CUANTITATIVO DE RIESGOS DE PROGRAMA EN LA CONSTRUCCIÓN.....                                                                                 | 10        |
| 3.4. SIMULACIÓN MONTE CARLO (SMC) .....                                                                                                                   | 12        |
| <b>4. ASPECTOS GENERALES SOBRE LA GESTIÓN ADMINISTRACIÓN Y DIRECCIÓN DE OBRAS CIVILES .....</b>                                                           | <b>13</b> |
| <b>5. CARACTERIZACIÓN DE LOS RIESGOS DE PROGRAMA.....</b>                                                                                                 | <b>15</b> |
| 5.1. IDENTIFICACIÓN DE LOS FACTORES DE RIESGO .....                                                                                                       | 15        |
| 5.2. CATEGORIZACIÓN DE LOS FACTORES DE RIESGO .....                                                                                                       | 17        |
| 5.3. CUALIFICACIÓN DE LOS FACTORES DE RIESGO .....                                                                                                        | 20        |
| 5.3.1. <i>Métodos de cualificación</i> .....                                                                                                              | 20        |
| 5.3.2. <i>Descripción del Análisis de Modo y Efectos de Falla de Riesgos de Proyectos (Project Risk - Failure Mode and Effects Analysis, RFMEA)</i> ..... | 22        |
| 5.3.3. <i>Aplicación del RFMEA a los riesgos de programa identificados en la Universidad del Valle</i> ...                                                | 26        |
| <b>6. CARACTERIZACIÓN DE LAS ESTRUCTURAS METODOLÓGICAS DE ANÁLISIS CUANTITATIVO DE RIESGOS BASADAS EN SIMULACIÓN MONTE CARLO .....</b>                    | <b>38</b> |
| 6.1. RISK ANALYSIS IN FIXED-PRICE DESIGN–BUILD CONSTRUCTION PROJECTS .....                                                                                | 38        |
| 6.2. JUDGMENTAL RISK ANALYSIS PROCESS (JRAP) .....                                                                                                        | 40        |
| 6.3. CONSTRUCTION PROJECT NETWORK EVALUATION WITH CORRELATED SCHEDULE RISK ANALYSIS MODEL (CSRAM) .....                                                   | 42        |
| 6.4. SCHEDULE RISK AND CONTINGENCY USING @RISK AND PROBABILISTIC ANALYSIS .....                                                                           | 49        |
| 6.5. PROPIEDADES DE LAS ESTRUCTURAS METODOLÓGICAS.....                                                                                                    | 50        |
| 6.5.1. <i>Características Principales</i> .....                                                                                                           | 50        |
| 6.5.2. <i>Ventajas</i> .....                                                                                                                              | 51        |
| 6.5.3. <i>Limitaciones</i> .....                                                                                                                          | 51        |
| 6.5.4. <i>Identificación de Riesgos</i> .....                                                                                                             | 52        |
| 6.5.5. <i>Propiedades del Riesgo</i> .....                                                                                                                | 52        |
| 6.5.6. <i>Propiedades de las duraciones de actividades</i> .....                                                                                          | 52        |
| 6.5.7. <i>Relación Riesgo - Actividad</i> .....                                                                                                           | 52        |
| 6.5.8. <i>Correlación Riesgos</i> .....                                                                                                                   | 53        |
| 6.5.9. <i>Software</i> .....                                                                                                                              | 53        |
| 6.5.10. <i>Requerimientos de Entrada</i> .....                                                                                                            | 53        |

|                                                                                                      |           |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 6.6. ANÁLISIS COMPARATIVO DE ESTRUCTURAS METODOLÓGICAS.....                                          | 53        |
| <b>7. APLICACIÓN DE LA ESTRUCTURA METODOLÓGICA AL CASO DE ESTUDIO Y ANÁLISIS DE RESULTADOS .....</b> | <b>56</b> |
| 7.1. ESTRUCTURA METODOLÓGICA AJUSTADA AL CASO DE ESTUDIO .....                                       | 56        |
| 7.2. PROYECTO CASO DE ESTUDIO.....                                                                   | 60        |
| 7.2.1. Contextualización.....                                                                        | 60        |
| 7.2.2. Descripción, objetivo y alcance del proyecto.....                                             | 61        |
| 7.2.3. Ejecución del proyecto.....                                                                   | 61        |
| 7.3 APLICACIÓN DE LA ESTRUCTURA METODOLÓGICA PROPUESTA .....                                         | 62        |
| 7.3.1. Elaboración del programa determinístico .....                                                 | 62        |
| 7.3.2. Definición de probabilidad e impacto potencial de los riesgos identificados.....              | 62        |
| 7.3.3. Definición del Grado de influencia de los riesgos sobre las actividades .....                 | 63        |
| 7.3.4. Construcción del Modelo .....                                                                 | 65        |
| 7.3.5. Resultados de la Simulación.....                                                              | 66        |
| 7.3.6. Discusión de resultados .....                                                                 | 68        |
| <b>8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>                                                       | <b>75</b> |
| <b>9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>                                                            | <b>78</b> |
| <b>10. ANEXOS.....</b>                                                                               | <b>81</b> |
| ANEXO 1. LISTA DE RIESGOS IDENTIFICADOS. ....                                                        | 81        |
| ANEXO 2. LISTA DE RIESGOS DEFINITIVA EVALUADA CON EL RFMEA. ....                                     | 83        |

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                            |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1.1. Duración de ejecución de los POC previstos en el PAI.....                      | 3  |
| Figura 1.2. Porcentaje de POC ejecutados del PAI hasta el año 2012.....                    | 4  |
| Figura 1.3. Disponibilidad de Recursos para Inversión en POC en el PAI .....               | 4  |
| Figura 5.1. Estructura de desglose de riesgos (RBS). ....                                  | 18 |
| Figura 5.2. Estructura de desglose de riesgos identificados (RBS). ....                    | 19 |
| Figura 5.3. Cantidad de riesgos por subcategoría. ....                                     | 19 |
| Figura 5.4. Proceso del RFMEA. ....                                                        | 22 |
| Figura 5.5. Diagrama de Pareto del RPN (Promedio).....                                     | 32 |
| Figura 5.6. Diagrama de Pareto del puntaje de riesgo (Promedio). ....                      | 33 |
| Figura 5.7. Diagrama de dispersión. ....                                                   | 35 |
| Figura 6.1. Pasos del JRAP. ....                                                           | 41 |
| Figura 6.2. Diagrama de flujo del modelo CSRAM .....                                       | 47 |
| Figura 7.1. Pasos de la metodología propuesta y contexto de aplicación. ....               | 57 |
| Figura 7.2. Distribución de probabilidad de la duración y fecha de entrega del proyecto... | 67 |
| Figura 7.3. Diagrama de tornado de los riesgos de programa.....                            | 68 |

## LISTA DE TABLAS

|                                                                                                                                                 |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 5.1. Artículos de investigación consultados.....                                                                                          | 16 |
| Tabla 5.2. Herramientas de cualificación.....                                                                                                   | 21 |
| Tabla 5.3. Escalas para estimar la probabilidad de ocurrencia. ....                                                                             | 23 |
| Tabla 5.4. Escalas para estimar el impacto en costo, tiempo y calidad. ....                                                                     | 24 |
| Tabla 5.5. Escala para estimar el valor de detección. ....                                                                                      | 24 |
| Tabla 5.6. Perfil de Experto .....                                                                                                              | 27 |
| Tabla 5.7. Expertos seleccionados. ....                                                                                                         | 27 |
| Tabla 5.8. Escalas para estimar la probabilidad de ocurrencia. ....                                                                             | 29 |
| Tabla 5.9. Escalas para estimar el impacto en tiempo. ....                                                                                      | 29 |
| Tabla 5.10. Escala para estimar el valor de detección. ....                                                                                     | 30 |
| Tabla 5.11. Riesgos descartados en la Prueba Piloto. ....                                                                                       | 30 |
| Tabla 5.12. Resumen de puntajes máximos en la evaluación de los expertos. ....                                                                  | 31 |
| Tabla 5.13. Puntajes críticos RPN y Puntaje de riesgo. ....                                                                                     | 33 |
| Tabla 5.14. Ubicación de riesgos por cuadrante. ....                                                                                            | 35 |
| Tabla 5.15. Riesgos identificados en el cuadrante uno. ....                                                                                     | 36 |
| Tabla 5.16. Lista de riesgos más importantes desde calificación cualitativa.....                                                                | 37 |
| Tabla 7.1. Probabilidades de ocurrencia de los riesgos. ....                                                                                    | 63 |
| Tabla 7.2. Parámetros del impacto potencial de cada riesgo. ....                                                                                | 63 |
| Tabla 7.3. Grados de influencia de los riesgos sobre las actividades. ....                                                                      | 65 |
| Tabla 7.4. Valor de Grados de influencia de los riesgos sobre las actividades.....                                                              | 66 |
| Tabla 7.5. Resultados estadísticos de la simulación. ....                                                                                       | 67 |
| Tabla 7.6. Comparación de resultados frente al comportamiento real del proyecto. ....                                                           | 69 |
| Tabla 7.7. Eventos reales causantes del retraso en el caso de estudio. ....                                                                     | 70 |
| Tabla 7.8. Riesgos priorizados según rango de variabilidad de la media de la duración total del proyecto basado en el diagrama de tornado. .... | 72 |
| Tabla 7.9. Tabla resumen resultados estadísticas simulaciones.....                                                                              | 73 |
| Tabla 7.10. Posicionamiento de los riesgos en las simulaciones. ....                                                                            | 74 |



## INTRODUCCIÓN

Los Proyectos de Obra Civil (POC) son referenciados en la normatividad colombiana como “Edificaciones”, es decir, construcciones cuyo uso primordial es la habitación u ocupación por seres humanos (ley 400 de 1997).

Frente al desarrollo de estos proyectos, la Universidad del Valle no cumple actualmente con los factores de éxito de los proyectos, ya que desde el año 2005 hasta el 2012 presenta un incumplimiento promedio de un 37% de dichos proyectos, además de un tiempo de ejecución promedio de 2.3 años (Cano y Rubiano, 2013), por encima de un tiempo máximo esperado de un año, es decir, una gran parte de los proyectos no se terminan realizando y los que se ejecutan se demoran más de lo planeado. Uno de los aspectos que influencia esta situación es la inadecuada gestión del riesgo de programa de la Universidad, que se ve reflejada en la formulación de planes de respuesta a los riesgos de programa sin fuertes bases cuantitativas. Este aspecto en un ambiente de recursos escasos como el de la Universidad del Valle representa ineffectividad. Lo que va en contra del desarrollo y el cumplimiento de la misión de la Universidad.

En vista de la gran importancia que tiene la correcta ejecución de los proyectos de obra civil, para el desarrollo y la competitividad de la Universidad, la elaboración de un plan de respuesta asertivo concentrado en los riesgos de mayor importancia, es decir, los de mayor impacto en la duración de los proyectos, es de relevancia crítica para asegurar la eficiente ejecución de las obras civiles y contribuir al logro de los objetivos de la Universidad.

Por consiguiente, a fin de suministrar mayores niveles de confiabilidad a la planeación y ejecución de los proyectos de obra civil, se hace necesario la evaluación de los riesgos de programa en la ejecución de las obras civiles. En esta medida se propone una priorización de riesgos para la elaboración de un futuro plan de respuesta, fundamentada en un modelo de análisis cuantitativo de riesgos basado en la aplicación de la Simulación Monte Carlo.

El contenido de esta investigación se estructura de la siguiente manera:

En los capítulos 1 y 2, se identifica el problema y se establecen los objetivos de la investigación. En el capítulo 3, se describen aspectos generales del análisis cuantitativo de riesgos de programa en POC. En el capítulo 4 se describen aspectos generales sobre la gestión, administración y dirección de obras civiles.

En el capítulo 5, se evidencia la caracterización de riesgos de programa, en la cual se identifican los riesgos mediante revisión de literatura, se categorizan según el origen mediante la estructura de desglose de riesgos, posteriormente se adapta y aplica la herramienta de cualificación de riesgos propuesta por Carbone y Tippet (2004) “Análisis de Efectos y Modos de Falla de Riesgos” (por sus siglas en inglés, RFMEA), con el fin de obtener una primera síntesis de los riesgos a ser modelados en el análisis cuantitativo.

En el capítulo 6, se exponen las estructuras consultadas, en cuanto a metodológicas de análisis cuantitativo de riesgos basado en la Simulación Monte Carlo. Se describen las perspectivas, procesos, supuestos y modelos. Se caracterizan en distintos aspectos como ventajas, limitaciones, características principales y otros aspectos. Además, se realiza un análisis comparativo entre dichas estructuras resaltando las diferencias y mejoras de una estructura a otra. Lo anterior, con el objetivo de sentar las bases de la estructura metodológica a diseñar y ajustar al caso de estudio. Finalmente, la formulación y explicación teoría de la estructura metodológica propuesta se detalla en este capítulo.

En el capítulo 7, se realiza la aplicación de la estructura metodológica propuesta, creada a partir del análisis de las estructuras metodológicas estudiadas. Esta estructura, plantea un enfoque metodológico de análisis cuantitativo de riesgos de programa basada en la Simulación Monte Carlo, para evaluar las redes de actividades de los POC bajo condiciones de incertidumbre, con el objetivo de determinar el tiempo total de terminación del proyecto tomando en consideración el impacto directo de factores de riesgo. Se plantea un caso de estudio y se aplica el modelo propuesto, se obtienen resultados, se validan y analizan, con el fin de obtener la priorización de riesgos de programa en obras civiles en la Universidad del Valle.

En el capítulo 8 se describen las conclusiones obtenidas de la investigación y se plantean futuros focos de trabajo.

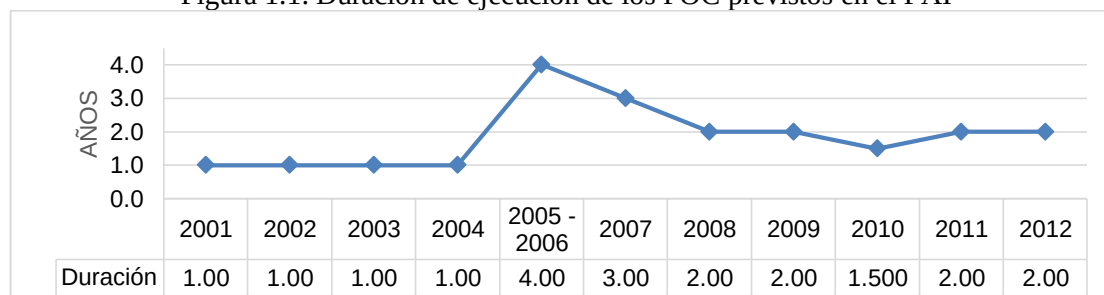
## 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La Universidad del Valle, principal institución académica del sur-occidente de Colombia, presenta un comportamiento desfavorable en el desempeño de los POC evaluados con respecto a los factores de éxito de los proyectos (alcance, tiempo, costo y calidad).

El desarrollo de estos proyectos en la Universidad del Valle sigue los procesos de la estructura clásica de la administración de proyectos: Iniciación, Planificación, Ejecución, “Monitoreo y Control” y Cierre propuesta por el PMI (2008). Parte del proceso de Planificación es establecido para cada año por la Oficina de Planeación y Desarrollo Institucional (OPDI) en el Plan Anual de Inversión (PAI); el cual es financiado con los recursos de la Estampilla Pro Universidad del Valle. En este plan se especifican los proyectos a ser ejecutados en la respectiva anualidad, entre los cuales se encuentran los POC.

A partir de esto se puede diagnosticar el desempeño del desarrollo de los POC, comparando la información de los planes anuales de inversión de los últimos años con la de sus respectivos informes de seguimiento (Documentos públicos elaborados por la OPDI). Por ejemplo, en la Figura 1.1 se muestra la duración real de ejecución, es decir, el tiempo que se demora la Universidad del Valle en ejecutar los rubros asignados a los POC en un determinado PAI (datos extraídos de los informes de seguimiento de cada PAI)\*. De esta manera, se logra consignar el tiempo de ejecución de los POC del PAI en la Figura 1.1, que corresponde desde el año 2005 al 2012 a un promedio anual de 2.3 años.

Figura 1.1. Duración de ejecución de los POC previstos en el PAI



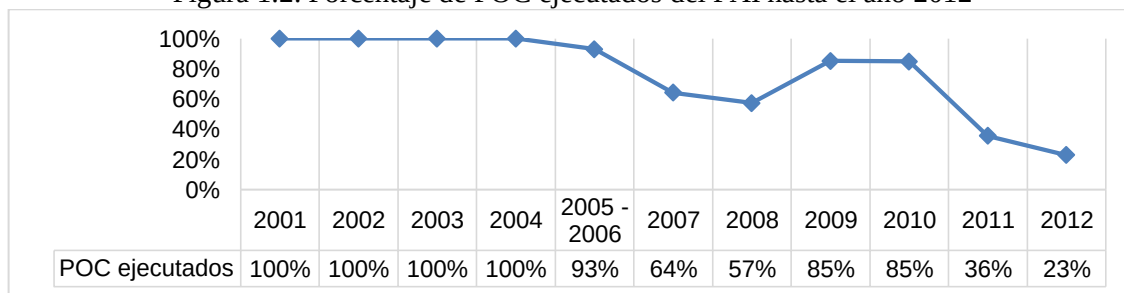
Fuente: Cano y Rubiano (2013), a partir de los Planes Anuales de Inversiones e Informes de Seguimiento del PAI de la Universidad del Valle de los años 2001 al 2012.

Por otra parte, para valorar la ejecución de los proyectos de los PAI, se toma el total de proyectos planificados y se confrontan con los datos de los Informes de Seguimiento del total de proyectos ejecutados. La razón entre estos datos expresa el porcentaje de ejecución de los POC desde el año 2001 (Fecha más reciente con datos disponibles) hasta el año 2012, el cual se muestra en la Figura 1.2. En esta Figura, se observa que el comportamiento del cumplimiento de los PAI evidencia una disminución desde el año 2005 hasta el 2012, lo

\* Para los años 2005 y 2006 se elaboró un único Plan Anual de Inversión y su respectivo Informe de Seguimiento.

que se traduce en un incumplimiento anual promedio de un 37% de los POC a ejecutar. Se aprecia también de esta Figura que hasta el 2004 se presenta un cumplimiento del 100% del PAI, esto se debe al poco presupuesto con que disponía la Universidad del Valle para ejecutar proyectos a causa de la pignoración de la Estampilla desde 1998 para cumplir con el pago de compromisos adquiridos previamente.

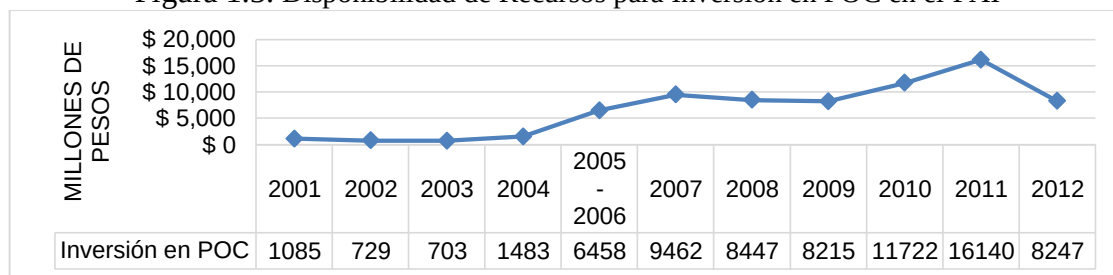
Figura 1.2. Porcentaje de POC ejecutados del PAI hasta el año 2012



Fuente: Cano y Rubiano (2013), a partir de los Planes Anuales de Inversiones e Informes de Seguimiento del PAI de la Universidad del Valle de los años 2001 al 2012.

Sin embargo, a partir del 2005 el PAI ha aumentado los recursos para inversión en los POC (Figura 1.3). Estas inversiones, que antes del 2005 no eran de consideración, significan para las divisiones administrativas involucradas en la ejecución de estos proyectos una carga de trabajo administrativo a la cual no estaban acostumbradas, lo que en parte incide en el desempeño actual de los indicadores expuestos en la Figura 1.1 y 1.2.

Figura 1.3. Disponibilidad de Recursos para Inversión en POC en el PAI



Fuente: Cano y Rubiano (2013), a partir de los Planes Anuales de Inversiones de los años 2001 al 2012.

Debido a que los POC no se terminan a tiempo se generan pérdidas de dinero no previstas inicialmente en el presupuesto, lo que incide directamente en la cancelación de proyectos al agotar el total de recursos disponibles para un determinado PAI.

Por otra parte, también se evidencia ineficacia en el cumplimiento de los POC, por ejemplo, en el año 2011, de los 61 proyectos aprobados en el PAI cuyo presupuesto fue de \$18.322.312.351, según la División de Administración de Bienes y Servicios, el 21.76% quedaron pendientes por autorizar, el 28.58% fueron autorizados y no ejecutados por variables externas, el 2.57% estuvo en proceso de pliegos de licitación, el 6.82% se encontraba en proceso de contratación y la mayoría se encontraba en ejecución con un

porcentaje de 37.47%. Tan solo el 1.52% de los proyectos se pudieron terminar (OPDI, 2011).

El fracaso en el cumplimiento de los factores de éxito de los proyectos ha sido ampliamente estudiado. Wallace (2010), por ejemplo, reconoce muchas de las razones más comunes para el fracaso de los proyecto, tales como:

- Vaga definición de los objetivos del proyecto y los resultados no identificables en términos concretos y medibles.
- Planes del proyecto carentes de detalle, dando lugar a la asignación de tiempo insuficiente e inadecuado apoyo financiero y / u otros recursos.
- No valoración de los grupos de interés clave del proyecto ni proporción del apoyo adecuado por parte de estos grupos.
- Carencia de un análisis de riesgo.
- Falta de control de cambios haciendo que el alcance del proyecto se expande sin control.
- Falta de comunicación.

El caso particular de los proyectos de construcción, como los que se pretenden estudiar en la Universidad del Valle, ha sido explicado desde las características y entorno de los mismos, por ejemplo, Edward (1995; citado por Öztaş y Ökmen, 2005), sugiere que cada proyecto de construcción tiene características únicas que lo diferencian de otros proyectos semejantes, ya sea por las técnicas de construcción, el diseño, los tipos de contrato, las responsabilidades, el tiempo, las condiciones del suelo, el entorno político, económico y muchos otros aspectos que ubican a cada proyecto en una atmosfera difusa. Así como Dey y Ramcharan (2008; citados por Dey, 2010), que aclaran que los proyectos de construcción están expuestos a un ambiente de incertidumbre debido a algunos factores como la complejidad de la planeación y el diseño, la presencia de varios grupos de interés, la disponibilidad de materiales, el ambiente climático, el entorno económico y político y los estatutos regulatorios. Los cuales no sólo pueden impedir que los proyectos sean realizados dentro del límite del presupuesto y el tiempo, sino que también amenazan las necesidades de calidad, de seguridad y de funcionamiento del proyecto de construcción (Öztaş y Ökmen, 2005).

Este ambiente difuso, hace necesaria una correcta Gestión de Riesgos para el desarrollo de los POC. Este proceso, según el PMI (2008) consta de: la planificación de la gestión del riesgo, la identificación de los riesgos, el análisis cualitativo de los riesgos, el análisis cuantitativo de los riesgos, la construcción de los planes de respuesta y finalmente el control y monitoreo.

Según las percepciones de algunos funcionarios de la Oficina de Contratación, encargada de considerar los riesgos asociados a un POC antes de efectuar un contrato, la Universidad del Valle solamente realiza las consideraciones y procesos mínimos exigidos por la ley.

Las regulaciones de ley a nombrar son el artículo 4° de la ley 1150 de 2007 “De la distribución de riesgos en los contratos estatales” que especifica que los pliegos de condiciones o sus equivalentes deberán incluir la estimación, tipificación y asignación de los riesgos previsibles involucrados en la contratación. Y los Artículos 3° y 88° del decreto 2474 de 2008 “Estudios y documentos previos” que especifican que los estudios y documentos previos deben señalar la distribución de riesgos que la entidad propone, que estos documentos se pondrán a disposición de los interesados y que deberán contener unos elementos mínimos, entre los cuales se encuentra “el soporte que permita la tipificación, estimación, y asignación de los riesgos previsibles que puedan afectar el equilibrio económico del contrato”.

Estas condiciones se cumplen, pero frente a una correcta gestión de riesgos representan un nivel mínimo de gestión, ya que considerar y distribuir la responsabilidad frente a unos posibles riesgos (actividad que se realiza actualmente en la institución) no implica una gestión exitosa. Este es el caso de los riesgos de programa (los que afectan la duración del proyecto) de los POC, los cuales no son tratados de manera rigurosa por la Universidad del Valle. Por ejemplo, aunque por requisitos de ley, se exige a los contratistas para la consecución de un contrato presentar un programa de proyecto (Programación de actividades en el tiempo), no se exige que estos programas tomen en consideración los riesgos, es decir, se presentan de manera determinística, como si no estuvieran expuestos a eventualidades.

Esto es uno de los muchos factores que influyen el incumplimiento y el desfase en la duración de los proyectos, ya Luu, Kim et al. (2009) afirmaron que muchos programas son desarrollados de una manera determinística; aun cuando en la realidad las actividades de construcción están sujetas a riesgos e incertidumbres y que como resultado de esto los retrasos en las obras son muy comunes, afectando directamente los factores clave de éxito de un proyecto.

La inadecuada gestión del riesgo de programa de la Universidad también se ve reflejada en el diseño de planes de respuesta a los riesgos de programa que consideran diversas estrategias como la eliminación, mitigación o transferencia de riesgos sin fuertes bases cuantitativas. Este aspecto en un ambiente de recursos escasos como lo es el de la Universidad del Valle representa ineffectividad, ya que se ignora que un plan de respuesta asertivo es aquel que se concentra en los riesgos de mayor importancia, es decir, los de mayor impacto en la duración de los POC, por lo que es imperativo priorizar estos riesgos. Priorización que abarca los riesgos de programa de un POC específico de la Universidad del Valle para la fase de ejecución de obra.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. Objetivo General**

Priorizar los riesgos de programa de un proyecto de Obra Civil de la Universidad del Valle mediante simulación Monte Carlo para la elaboración de un futuro plan de respuesta.

### **2.2. Objetivos Específicos**

- Caracterizar los riesgos de programa de los proyectos de Obra Civil de la Universidad del Valle mediante revisión de literatura y consulta a expertos.
- Caracterizar las estructuras metodológicas documentadas en la literatura sobre análisis cuantitativo de riesgos de programa basadas en la Simulación Monte Carlo.
- Aplicar una estructura metodológica ajustada al caso de estudio que permita priorizar los riesgos de programa de un proyecto de Obra Civil de la Universidad del Valle.

### **3. ASPECTOS GENERALES DEL ANÁLISIS CUANTITATIVO DE RIESGOS DE PROGRAMA EN PROYECTOS DE OBRA CIVIL**

A continuación se presentan los temas que son ejes para la investigación, sobre el ámbito de la Gestión de Riesgos y más específicamente el concerniente al Análisis Cuantitativo de Riesgos de Programa en Proyectos de Obra Civil.

#### **3.1. Los Proyectos y la Gestión del Riesgo**

Según la definición del PMI (2008), un proyecto: *“Es un esfuerzo temporal emprendido para crear un producto, servicio o un resultado, cuya naturaleza temporal indica un comienzo y final definidos”*. El éxito de los proyectos de construcción es evaluado sobre la base de medidas como la calidad, la suficiencia del alcance, el entorno social y medio ambiental, la funcionalidad técnica, los requisitos de seguridad, el plazo de ejecución previsto y el presupuesto asignado (Ökmen y Öztaş, 2008).

La gestión de proyectos es la aplicación de conocimientos, habilidades, herramientas y técnicas para ejecutar las actividades y cumplir con los requisitos del proyecto, esta gestión incluye los procesos de Iniciación, Planificación, Ejecución, Monitoreo - Control y Cierre. (PMI, 2008). Dentro de estos procesos se encuentra la gestión de riesgo.

La gestión de riesgos como proceso en la estructura de la gerencia de proyectos se ha desarrollado desde varias perspectivas. Por ejemplo, Barry Boehm propuso un modelo de gestión del riesgo que se divide en la evaluación del riesgo y el control del riesgo (Masood Uzzafer, 2010). Por otro lado, Dikmen (2004; Citado por Ökmen y Öztaş, 2008), la define como un proceso sistemático para el control de los riesgos previstos que se plantean en un proyecto, además la gestión de riesgos también se plantea como un procedimiento paso a paso que consiste en la identificación, clasificación, análisis y acciones de respuestas (Flanagan y Norman, 1993).

La evolución de las distintas perspectivas de la gestión del riesgo ha llevado a que hoy en día, la gestión del riesgo, según el PMI (2008) se defina como: *“El proceso sistemático de identificación, análisis y la respuesta a los riesgos del proyecto, el cual se divide en seis pasos los cuales son la planificación de la gestión del riesgo, la identificación de riesgos, el análisis de riesgos cualitativo, el análisis de riesgos cuantitativo, los planes de respuesta y el control y monitoreo de riesgos”*. De esta manera se presenta a continuación el proceso definido por el PMI (2008) sobre la gestión del riesgo.

##### **3.1.1. Planificación de la gestión del riesgo**

El plan de gestión de riesgos es el proceso de definir como llevar a cabo las actividades de la gestión de riesgos para un proyecto, la planificación de este proceso es muy importante para asegurar en qué medida la gestión de riesgos es relevante para el proyecto y además



sirve para proporcionar los recursos y el tiempo suficiente para las actividades de la gestión de riesgos y para establecer una base acordada para la evaluación de riesgos (PMI, 2008).

### **3.1.2. Identificación de riesgos**

Es el proceso donde se identifican los riesgos mediante revisión de documentación e información, listas de chequeo, aplicación de técnicas de recopilación, juicio de expertos, análisis de supuestos, análisis DOFA, etc. Con el objetivo de registrar los riesgos que pueden afectar un proyecto; describiendo el evento, el impacto y sus causas (PMI, 2008).

### **3.1.3. Análisis cualitativo de riesgos**

Según el PMI (2008) el análisis cualitativo de riesgos es el proceso de priorización o síntesis de riesgos para su análisis mediante la evaluación y combinación de la probabilidad de ocurrencia e impacto. Por su parte, Ökmen y Öztaş (2008) lo describen como el proceso realizado después de la identificación de los riesgos, que recolecta la información obtenida a través del juicio directo, las opciones de clasificación y comparación, y el análisis descriptivo. Lo anterior sugiere que el análisis cualitativo es el proceso subsecuente a la identificación, en la cual se le asignan distintas calificaciones a los riesgos con el propósito de sintetizar los mismos, y realizar un posterior análisis de mayor envergadura.

Según el PMI (2008), para el desarrollo de este proceso se utilizan varias técnicas como la matriz de probabilidad e impacto, la evaluación de la confiabilidad de los datos, la categorización de los riesgos, la evaluación de la urgencia de los riesgos y el juicio de expertos para la evaluación de los riesgos en cuanto a su probabilidad e impacto.

### **3.1.4. Análisis cuantitativo de riesgos**

Según el PMI (2008), es el proceso de analizar numéricamente el efecto de los riesgos identificados sobre los objetivos del proyecto. Como proceso se nutre de la identificación de riesgos, con el objetivo de actualizar los registros del riesgo y medir el impacto en los objetivos del proyecto (como por ejemplo la duración), mediante diferentes herramientas como técnicas de recopilación de datos como entrevistas y estimación de distribuciones de probabilidad, técnicas de modelado y análisis de riesgo como el análisis de sensibilidad, el análisis de valor esperado, la modelación y simulación, además de tener en cuenta el juicio de expertos.

### **3.1.5. Planes de respuesta**

El plan de respuesta a los riesgos, es el proceso de desarrollar opciones y acciones para mejorar las oportunidades y reducir las amenazas a los objetivos del proyecto, mediante las estrategias como evasión, transferencia, mitigación y aceptación (PMI, 2008).

### **3.1.6. Control y monitoreo de riesgos**

Este proceso es para la implementación de los planes de respuesta a los riesgos, el seguimiento de los riesgos identificados, supervisar los riesgos nuevos y residuales además de evaluar la eficacia en todo el proyecto de gestión del riesgo (PMI, 2008).

### **3.2. Programación Aplicada en Proyectos**

Según Vanhoucke (2012) la programación de proyectos comenzó como una vía de investigación en el campo de la Investigación de Operaciones con el fin de determinar matemáticamente el inicio y culminación de los tiempos de las actividades de un proyecto sujeto a restricciones de precedencia y recursos mientras se optimiza un determinado objetivo del proyecto (por ejemplo, reducción de la duración, la optimización del flujo de caja, etc).

Las investigaciones iniciales realizadas a finales de 1950 se centraron principalmente en las técnicas basadas en red, tales como el Método del Camino Crítico (por sus siglas en inglés, CPM) y la Técnica de Revisión y Evaluación de Programas (por sus siglas en inglés, PERT) que todavía son ampliamente reconocidos como importantes herramientas y técnicas de gestión de proyectos. A partir de este momento en adelante, una cantidad sustancial de investigaciones se han llevado a cabo en diversas áreas de la programación de proyectos (por ejemplo, programación de tiempo, la programación de recursos y programación de costos).

La debilidad más notoria de las técnicas basadas en red, como el método CPM, es que trabajan con valores de duración de actividades determinísticas, los cuales no consideran cambios ocasionados por la influencia de factores de riesgo, lo cual repercute en la imprecisión de la identificación de la ruta crítica y de igual modo en la medición del tiempo de terminación del proyecto (Ökmen y Öztaş, 2008).

Según Vanhoucke (2012) se podría entonces sintetizar que la programación de actividades de proyectos consiste en construir una tabla de tiempo que provee el inicio y el final de cada actividad del proyecto, considerando las relaciones entre las actividades, restricciones de recursos y otras características del proyecto con el objetivo de alcanzar un objetivo determinado en la programación.

### **3.3. Análisis Cuantitativo de Riesgos de Programa en la Construcción**

El riesgo de programa se define como todo riesgo que afecte únicamente al programa, a pesar de esto, Ökmen y Öztaş (2008), comentan que todos los riesgos en un proyecto de construcción pueden ser riesgos de programa porque están relacionados con el programa directamente o indirectamente, por otra parte, todas las actividades pueden ser críticas debido a la incertidumbre, inclusive aquellas actividades que no son críticas de acuerdo con el CPM.

Assaf y Al-Hejji (2006; citados por Luu, Kim et al., 2009), agruparon los mayores factores de riesgo causantes de los retrasos en los proyectos de construcción los cuales han sido discutidos en muchas revistas y reportes científicos, como se muestran a continuación:

- |                                                         |                                                     |
|---------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| • Factores relacionados con el proyecto                 | • Factores relacionados con el diseño               |
| • Factores relacionados con los directivos del proyecto | • Factores relacionados con la fuerza de trabajo    |
| • Factores relacionados con el contratista              | • Factores relacionados con la maquinaria y equipos |
| • Factores relacionados con los consultores             | • Factores relacionados con el medio ambiente       |

Según Vanhoucke (2012), el Análisis de Riesgos de Programa consiste en analizar las fortalezas y debilidades de un programa de actividades, a fin de obtener información sobre la sensibilidad de la duración y los posibles cambios que sin duda se producen durante la marcha del proyecto.

Ökmen y Öztaş (2008), comentan que hasta el momento varios modelos de Análisis de Riesgos de Programa se han desarrollado por investigadores para proveer información concerniente a la sensibilidad de los factores de riesgo, incorporando el efecto de la correlación en los programas y apoyando la gestión de riesgos de programa en el desarrollo de estrategias de respuesta, como por ejemplo:

- *Modelo para la determinación de la incertidumbre (MUD) por Carr (1979).*
- *Pronóstico de la duración del proyecto (PRODUF) por Ahuja y Nandakumar (1985).*
- *PLATFORM por LevittandKunz (1985).*
- *Modelo de valor esperado condicional (CEV) por Ranasingheand Russell (1992).*
- *Simulación exacta por Touran y Wiser (1992).*
- *Simulación de factores por Woolery and Crandall (1983).*
- *Redes bajo condiciones de incertidumbre correlacionadas NETCOR por Wang y Demsetz (2000).*
- *Proceso de análisis cuantitativo de riesgos teniendo en cuenta la consulta a expertos (JRAP) por Ökmen y Öztaş (2006).*

Este tipo de análisis también se han trabajado con métodos avanzados como herramientas multi-criterio como el propuesto por Dey (2010), el cual relaciona el juicio de los involucrados con los factores de riesgo mediante un “Analytic hierarchy process” (AHP), o el Análisis de Modos y Efectos de Fallos para los Riesgos de Proyectos Difuso (por sus siglas en Inglés, RFMEAF). Siendo esta última una propuesta metodológica de Zhang y Chu (2011), que integra, la priorización de riesgos con la probabilidad, el impacto y la posibilidad de que el riesgo sea detectado.

Otro método como el propuesto por Öztaş y Ökmen (2005), presenta una metodología de análisis de riesgo de programa para proyectos de construcción denominada JRAP (Judgmental Risk Analysis Process), que permite determinar la variación de la duración de las actividades en los programas de proyectos de construcción utilizando el juicio de expertos.

Posteriormente, los mismos autores presentaron otra metodología, llamada CSRAM (Correlated Schedule Risk Analysis Model), que permite determinar la variación de la duración de las actividades en los programas de proyectos de construcción, considerando la correlación entre factores de riesgo. Por otro lado, Luu, Kim et al. (2009), presentaron un modelo que permite cuantificar la probabilidad de los retrasos en la construcción, llamado “Bayesian Belief Network” (BBNs), el cual se basa en el teorema de Bayes.

### **3.4. Simulación Monte Carlo (SMC)**

Como lo comentan Pepe y Périssé (2006), el método de SMC es una herramienta de investigación y planeación; básicamente es una técnica de muestreo artificial, empleada para operar numéricamente sistemas complejos que tengan componentes aleatorios. Al igual que comenta Palisade (2013), es una técnica tradicional que utiliza números aleatorios para recolectar las muestras de una distribución de probabilidad. Los orígenes de esta técnica están ligados al trabajo desarrollado por Stan Ulam y John Von Neumann a finales de los 40, cuando investigaban el movimiento aleatorio de los neutrones.

Gracias a la constante evolución de las microcomputadoras, en lo que se refiere a su capacidad de procesamiento de la información, el método de Monte Carlo es cada vez más frecuentemente utilizado (Pepe y Périssé, 2006). Hoy en día es posible encontrar modelos que hacen uso de SMC en las áreas informática, empresarial, económica, industrial e incluso social, en otras palabras, la SMC está presente en todos aquellos ámbitos en los que el comportamiento aleatorio o probabilístico desempeña un papel fundamental.

La SMC en el ámbito de proyectos, es frecuentemente utilizada como herramienta dentro del proceso de cuantificación del riesgo, ya que permite traducir los detalles de la incertidumbre sobre el proyecto (PMI, 2008). Lo anterior, abre la posibilidad a desarrollar planes de respuestas a los riesgos incorporando una cuantificación del impacto de los riesgos en un proyecto, y generar un ranking de prioridad para estos planes en función de la cuantía de su impacto.

A la luz de las perspectivas consultadas, se puede sintetizar entonces que el Análisis Cuantitativo de Riesgos mediante SMC consiste en determinar el impacto de los riesgos identificados mediante la realización de corridas de simulación con el objetivo de identificar el rango de posibles resultados para un componente del proyecto estudiado, predecir el resultado probable de un evento y soportar la toma de decisiones concernientes al proyecto.

#### 4. ASPECTOS GENERALES SOBRE LA GESTIÓN ADMINISTRACIÓN Y DIRECCIÓN DE OBRAS CIVILES

Para comprender el análisis cuantitativo de los riesgos de programa en los POC de la Universidad del Valle es necesario estudiar los diferentes conceptos que sobre este proceso existen en el campo teórico, así como aspectos relevantes alusivos a la gestión, administración y dirección de obras civiles.

Hay que tratar de definir qué es el proceso edificatorio y cuáles son los agentes que intervienen en ese proceso. Al revisar el marco legal de los POC se puede establecer lo que se entiende en Colombia por construcción y los tipos de estos proyectos y cuáles son algunos de los actores que se desenvuelven en este entorno (Ley 52 de 1993, ley 80 de 1993 y ley 400 de 1997).

Algunas definiciones que traen estas leyes, y que es importante señalarlas son:

**Construcción.** Incluye i) las edificaciones, que son construcciones cuyo uso primordial es la habitación u ocupación por seres humanos (ley 400 de 1997), ii) las obras públicas, por ejemplo, aeropuertos, muelles, puertos, canales, embalses, obras relacionadas con la prestación de servicios entre otras que son nombradas al detalle en la norma y iii) el montaje y desmontaje de edificios u estructuras a base de elementos prefabricados. (Ley 52 de 1993).

**Propietario.** Es la persona, natural o jurídica, dueña del predio, a nombre de la cual se expide la licencia de construcción y quien contrata los diferentes profesionales que intervienen en el diseño, la construcción y la supervisión técnica de la estructura de la edificación y de los elementos no estructurales contemplados por esta ley y sus reglamentos (ley 400 de 1997).

**Contratista.** Son contratistas independientes y, por tanto, verdaderos patronos y no representantes ni intermediarios, las personas naturales o jurídicas que contraten la ejecución de una o varias obras o la prestación de servicios en beneficio de terceros, por un precio determinado, asumiendo todos los riesgos, para realizarlos con sus propios medios y con libertad y autonomía técnica y directiva (Código sustantivo del trabajo, artículo 34).

**Consultor.** Personas naturales o jurídicas de derecho público o privado referidos a los estudios necesarios para la ejecución de proyectos de inversión, estudios, de diagnóstico, prefactibilidad o factibilidad para programas o proyectos específicos, así como las asesorías técnicas de coordinación, control y supervisión de proyectos de infraestructura y edificaciones. También los que tienen por objeto la interventoría, asesoría, gerencia de obra o de proyectos, dirección, programación y la ejecución de diseños, planos, anteproyectos y proyectos en infraestructura y edificaciones (Artículo 2, decreto 1141 de 2010).

**Interventor.** Es el profesional, ingeniero civil o arquitecto, que representa al propietario durante la construcción de la edificación, bajo cuya responsabilidad se verifica que ésta se adelante de acuerdo con todas las reglamentaciones correspondientes, siguiendo los planos, diseños y especificaciones realizados por los diseñadores (ley 400 de 1997).

En síntesis estas leyes permiten una aproximación a las normatividades de la administración y dirección de obras para el sector público. También en la ley 400 de 1997 aparece un aspecto de gran importancia a tomar en cuenta para el desarrollo del trabajo como lo son las figuras jurídicas en el ámbito Colombiano de: Contratista, Consultor, Interventor y Propietario. Estas figuras son de vital importancia, ya que son los principales actores involucrados en los POC y por lo tanto a los cuales pueden ser adjudicados algunos de los diferentes riesgos.

Se toma como proyectos de Obra Civil para el desarrollo de este trabajo de grado los referentes a “Edificaciones” que son los tipos de proyectos realizados en la Universidad. Se especifica también que el análisis cuantitativo de riesgos de programa a realizar en este trabajo solo abarca la fase de construcción de la Obra y no las fases de planificación, ejecución, mantenimiento y disposición.

## **5. CARACTERIZACIÓN DE LOS RIESGOS DE PROGRAMA**

Los proyectos de construcción presentan retrasos en la programación de sus distintas actividades a lo largo de sus diferentes fases lo que provoca un exceso en los tiempos de ejecución total de los proyectos inicialmente planteados. En la Universidad del Valle también ocurre este fenómeno y es causado por múltiples factores entre los cuales algunos pueden ser identificados como riesgos de programa, lo que definen Lledó, P., y Rivarola, G, (2007) como eventos inciertos que en caso de que ocurran tendrán un efecto negativo sobre la duración total del proyecto.

Estos riesgos, deben ser evaluados respecto al contexto propio de la Universidad para lograr una identificación y cualificación de los riesgos de programa coherente con su marco de desarrollo. Y de esta forma, obtener las características de los riesgos de programa de los POC que es documentada en este capítulo y que finalmente aporta los riesgos a ser evaluados en el análisis cuantitativo.

En esta línea, es fundamental para el desarrollo de la caracterización, una revisión de los aportes ya realizados en aspectos como los riesgos en POC registrados en la literatura (Sección 5.1) así como la categorización (Sección 5.2) y cualificación (Sección 5.3) de estos riesgos; siempre adaptando los resultados obtenidos de esta revisión al contexto Colombiano y de la Universidad del Valle lo que finalmente aporta los riesgos a evaluar en el Análisis Cuantitativo.

### **5.1. Identificación de los factores de riesgo**

La identificación de los factores de riesgo que potencialmente podrían deteriorar o mejorar la ejecución de un proyecto en particular se lleva a cabo actualmente con herramientas y técnicas entre las que según Galway (2004) se pueden destacar:

- La revisión de documentación e información histórica relacionada con el proyecto (información secundaria).
- Tormenta de ideas.
- Método Delphi.
- Análisis DOFA (Debilidades, Oportunidades, Fortalezas y Amenazas).

La identificación de los riesgos de programa en este trabajo fue realizada mediante la revisión 13 artículos de investigación (Tabla 5.1) en los que se encontraron una gran cantidad de causas de retrasos. Además de esta fuente, se consultó a dos profesionales del sector de construcción y documentos de la Oficina de Contratación de la Universidad del Valle con riesgos ya identificados. En adelante se hará referencia a cada artículo según la numeración de la Tabla 5.1.

Tabla 5.1. Artículos de investigación consultados.

| ID | Artículo                                                                                                          | País            | Año de publicación | Riesgos de programa | Autor principal |
|----|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|--------------------|---------------------|-----------------|
| 1  | Risk management for overseas construction projects                                                                | China           | 1995               | 58                  | Zhi             |
| 2  | Risk management perceptions and trends of US construction                                                         | U.S.A.          | 1995               | 26                  | Kangari         |
| 3  | A comparative study of causes of time overruns in Hong Kong construction projects                                 | China           | 1997               | 20                  | Chan            |
| 4  | Risk management trends in the Hong Kong construction industry: a comparison of contractors and owners perceptions | China           | 1999               | 26                  | Ahmed           |
| 5  | Risk and its management in the Kuwaiti construction: a contractors perspective                                    | Kuwait          | 2001               | 26                  | Kartam          |
| 6  | Causes of construction delays: traditional contracts                                                              | Jordania        | 2002               | 28                  | Al-Momani       |
| 7  | Risk management framework for construction projects in developing countries                                       | Singapur        | 2004               | 28                  | Wang            |
| 8  | Causes of delay in large construction projects                                                                    | Arabia Saudita  | 2006               | 70                  | Assaf           |
| 9  | The importance and allocation of risks in Indonesian construction projects                                        | Indonesia       | 2006               | 27                  | Andi            |
| 10 | Risks faced by Singapore firms when undertaking construction projects in India                                    | Singapur        | 2006               | 5                   | Ling            |
| 11 | Risk assessment and allocation in the UAE construction industry                                                   | Emiratos Arabes | 2008               | 42                  | El-Sayegh       |
| 12 | Quantifying schedule risk in construction projects using Bayesian belief networks                                 | Vietnam         | 2009               | 16                  | Luu             |
| 13 | Ranking of delay factors in construction projects after Egyptian revolution                                       | Egipto          | 2013               | 99                  | Aziz            |

Fuente: Elaboración propia.

Los riesgos encontrados en los artículos de investigación consultados (Tabla 5.1) fueron obtenidos a través de encuestas dirigidas a profesionales involucrados con el sector de construcción, de distintas empresas y que trabajaban en distintos nichos dentro del sector (Infraestructuras, obras civiles, vivienda, etc) a los que se les consultaba los riesgos existentes que afectan los factores de éxito de los proyectos de construcción (Costo, Tiempo y Calidad) y sus posibles categorizaciones. Adicionalmente, los estudios revisados señalan los riesgos de mayor importancia encontrados y sugieren posibles maneras de afrontarlos.



Sin embargo, la importancia que se le da a los riesgos en estos estudios es relativa a los contextos en donde las investigaciones son realizadas, por ejemplo, en estudios realizados en Arabia Saudita un proyecto puede verse afectado por efectos de altas temperaturas en el clima, lo que en el marco Colombiano no sería aplicable. De lo anterior, es evidente que estos estudios no toman en cuenta el contexto y particularidades en el que se desarrollan los POC de la Universidad del Valle.

Por esta razón, no se tomó como punto de partida los riesgos señalados como los más importantes en estas investigaciones. En su lugar, se desarrolló un proceso sistemático para extraer de estos artículos los riesgos de relevancia para el contexto de la Universidad.

El proceso consistió en primer lugar en un registro de los 471 riesgos encontrados en los artículos de investigación (Tabla 5.1) y su respectiva comparación descartando riesgos repetidos, implícitos en otros y los no aplicables al contexto. Adicionalmente, se complementó el proceso con los riesgos aportados por dos expertos y los riesgos obtenidos a partir de una lista de riesgos aportada por la Oficina de Contratación de la Universidad. Obteniendo así los riesgos del Anexo 1, lista con los 65 riesgos a ser evaluados en la siguiente fase de la caracterización de riesgos, la referente a la calificación cualitativa de estos riesgos.

## **5.2. Categorización de los factores de riesgo**

Uno de las técnicas del proceso cualitativo de riesgos, presentadas por el PMI (2008), es la categorización de los riesgos. Esta, hace referencia a la organización de los riesgos según una característica en común, ya sea el origen o fuente de los riesgos, el área o fases en las que pueden afectar los riesgos, etc. Teniendo en cuenta esto, y basándose en los riesgos ya identificados, el primer paso consistió en definir la forma de categorizar los riesgos para posteriormente categorizarlos.

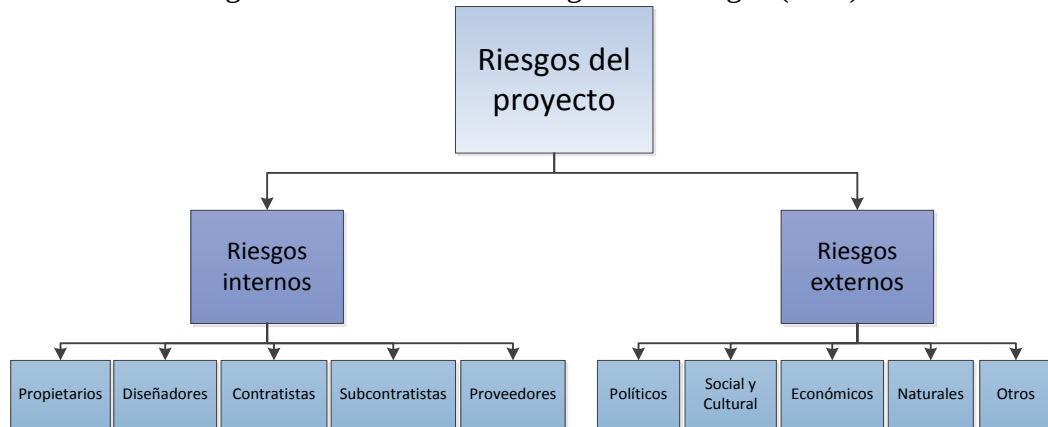
Se encontraron distintas categorizaciones en la revisión de literatura, como por ejemplo la de Zhi (1995), que Implementa cuatro categorías que son nación, Industria de la construcción, compañía y el proyecto, o la categorización hecha por Luu, Kim et al. (2009) donde se definen nueve categorías dependiendo del origen y la relación de los riesgos como por ejemplo si están relacionados con el proyecto en sí, el propietario, el contratista, el consultor, diseñadores, materiales, fuerza laboral, equipo y medio ambiente.

Por otro lado, El-Sayegh (2008), propone una estructura de desglose de riesgos (RBS, por sus siglas en Inglés), la cual es una adaptación de la propuesta por el PMI (2008), donde se clasifican los riesgos dependiendo del origen.

La RBS propuesta por El-Sayegh (2008), aclara que los riesgos del proyecto están divididos en dos grupos acorde a su origen (Ver Figura 5.1). Están los internos y externos, donde los internos son aquellos riesgos sobre los cuales el equipo del proyecto puede ejercer control y los externos son aquellos riesgos que no se pueden ejercer control. Dentro de los riesgos

internos se encuentran los riesgos asociados a los propietarios, diseñadores, contratistas, subcontratistas y proveedores, por el otro lado dentro de los riesgos externos se encuentran los riesgos políticos, sociales y culturales, económicos, naturales y otros.

Figura 5.1. Estructura de desglose de riesgos (RBS).



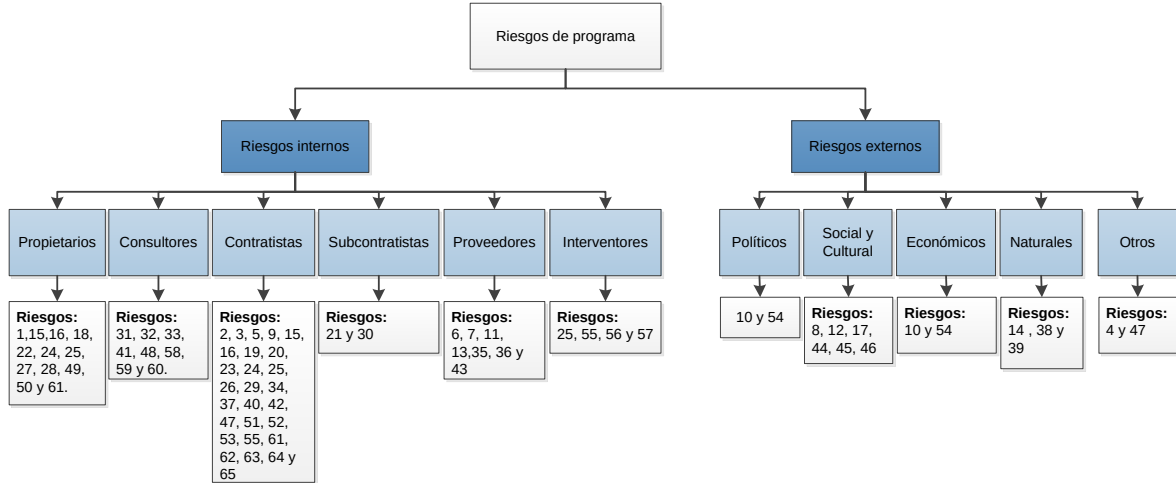
Fuente: Traducido y adaptado de, El-Sayegh (2008).

Se tomó como referencia la estructura de desglose de riesgos RBS, ya que es una adaptación más detallada, de la categorización propuesta por el PMI (2008), siendo una representación organizada jerárquicamente de los riesgos identificados del proyecto, ordenados por categorías y subcategorías que identifican diversas áreas y causas de los riesgos potenciales, adaptándose a proyectos específicos y contextos particulares.

Se propone que la estructura del artículo de El-Sayegh (2008), se debe adaptar al ámbito Colombiano, por lo que se decidió modificar el termino diseñadores por el termino consultores, redefiniendo entonces una subcategoría de consultores en consistencia con la Ley 80 de 1993, que señala la inclusión de los diseñadores como consultores. Además se incluyó otra subcategoría para los riesgos inherentes de los interventores de una obra civil.

De esta manera, la lista de riesgos presentada en el Anexo 1, se categorizó basándose en la adaptación mencionada de la RBS por El-Sayegh (2008) que se presenta en la Figura 5.2.

Figura 5.2. Estructura de desglose de riesgos identificados (RBS).

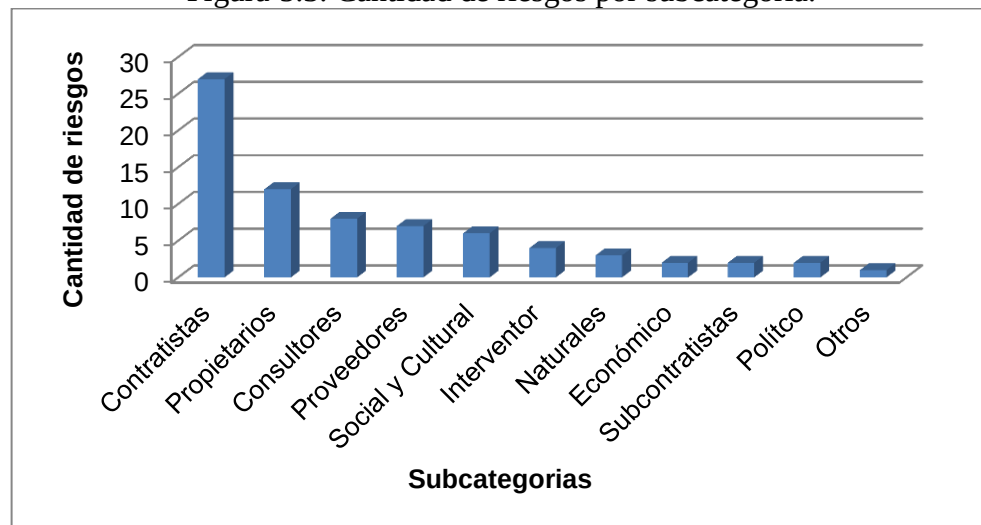


Fuente: Elaboración propia.

La categorización realizada presentó varias particularidades. En primera instancia la mayoría de los riesgos se clasificaron como riesgos internos y en gran medida en la subcategoría de contratistas. En segundo lugar, nueve riesgos que se identificaron, comparten dos subcategorías. Esto quiere decir que existen riesgos que pueden originarse por dos fuentes, como por ejemplo, “Los Retrasos en resolver problemas contractuales” (Riesgo identificado con el número 15), son ocasionados por los contratistas y los propietarios del proyecto.

Teniendo la cantidad de riesgos clasificados en cada subcategoría de la RBS, se grafica un diagrama de barras, con el fin de observar la distribución de los riesgos por su origen (Figura 5.3).

Figura 5.3. Cantidad de riesgos por subcategoría.



Fuente: Elaboración propia.

Como se observa en la Figura 5.3, de los 65 riesgos, la gran mayoría presenta su origen en la subcategoría de los contratistas. Este comportamiento puede ser explicado ya que el ejecutor de una obra civil es el contratista y es sobre quien existe mayor control debido a la gran cantidad de dificultades que puede presentar.

Por otro lado los riesgos cuyo origen es compartido, son los asociados a conflictos entre distintas partes y los riesgos económicos y políticos. Es preciso aclarar que la sumatoria de los riesgos categorizados no es igual a los 65 identificados, ya que existen 9 de estos que están en dos subcategorías por su origen.

### **5.3. Cualificación de los factores de riesgo**

Después de la identificación de los riesgos, el enfoque cualitativo recolecta la información obtenida a través del juicio directo, las opciones de clasificación y comparación, y el análisis descriptivo (Ökmen y Öztaş, 2008).

Para realizar esta cualificación de riesgos en proyectos, se pueden usar diversas técnicas como las propuestas por el PMI (2008), entre estas se encuentran las técnicas de evaluación de la probabilidad e impacto por riesgos, la evaluación de la confiabilidad de los datos, la evaluación de la importancia de los riesgos, entre otras.

En esta línea, se registran en la Sección 5.3.1 diversos métodos de calificación, de los que se determinó utilizar la técnica RFMEA propuesta por Carbone y Tippet (2004). Método que implica la calificación cualitativa de los riesgos por parte de un grupo de expertos en términos de tres dimensiones: probabilidad de ocurrencia, impacto y probabilidad de detección, la técnica se describe detalladamente en la Sección 5.3.2.

Finalmente, en la Sección 5.3.3 se explica el proceso de aplicación de la técnica RFMEA. Aplicación que requirió realizar una prueba piloto antes de evaluar los riesgos con el grupo de expertos definitivos, llevar a cabo los ajustes necesarios a la técnica (derivados de la prueba piloto) y finalmente emplear esta adaptación del RFMEA.

#### **5.3.1. Métodos de cualificación**

En miras de continuar el proceso de cualificación de riesgos, en la revisión de literatura se identificaron distintos métodos los cuales se pueden observar en la Tabla 5.2.

Tabla 5.2. Herramientas de cualificación

| Herramientas de cualificación |                                                                            |                                                                                                                                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|-------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                               | Nombre                                                                     | Artículo                                                                                                                                                                                                             | Descripción                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| 1                             | RFMEA                                                                      | <b>Título:</b> Project Risk Management Using the Project Risk FMEA<br><b>Autores:</b> Thomas A. Carbone y Donald D. Tippet<br><b>Año:</b> 2004                                                                       | Es una herramienta para cualificar los riesgos, donde se debe asignar la probabilidad de ocurrencia, el impacto relacionado con algún objetivo del proyecto, y la probabilidad de detección. Con estas variables se origina la puntuación del riesgo y el RPN, los cuales se grafican en diagramas de dispersión y Pareto para determinar los valores críticos y conocer los riesgos mas importantes. |
| 2                             | Índice Relativo de Importancia y Spearman Rank                             | <b>Título:</b> Risk assessment and allocation in the UAE construction industry - Causes of construction delay: traditional contacts.<br><b>Autores:</b> Sameh Monir El-Sayegh<br><b>Año:</b> 2007                    | El índice relativo de importancia es un promedio ponderado (se utilizan escalas de 1 a 5 para evaluar el impacto y la probabilidad) de todas las calificaciones de cada riesgo, y el Spearman Rank es un coeficiente de relación entre Ranking que se utiliza para cotejar los rankings de los distintos involucrados como contratista, contratante y consultor.                                      |
| 3                             | Scoring por significancia en Retrasos                                      | <b>Título:</b> Risk and its managment in the kuwaiti construction industry: a contractors perspective<br><b>Autores:</b> Nabil A. Kartama y Saied A. Kartamb<br><b>Año:</b> 2000                                     | Es una calificación de 1 a 10, indicando el impacto en los retrasos en los proyectos, donde 10 es que genera una gran impacto en los retrasos y 1 es un Impacto imperceptible. Por lo que al final se utiliza un diagrama de Pareto para revelar los riesgos prioritarios.                                                                                                                            |
| 4                             | Scoring por significancia en Retrasos utilizando Promedio y Cronbach alpha | <b>Título:</b> Quantifying schedule risk in construction projects using Bayesian belief networks<br><b>Autores:</b> Van Truong Luu a, Soo-Yong Kim b,*, Nguyen Van Tuan c, Stephen O. Ogurlana d<br><b>Año:</b> 2007 | Es un puntaje que se le asigna a cada factor de 1 a 5 según el impacto en retrasos en los proyectos, donde se define un promedio mínimo y un estadístico llamado Cronbach alpha mínimo el cual es un coeficiente que sirve para medir la fiabilidad de una escala de medida; con el fin de determinar los riesgos que mas inciden en los retrasos en los proyectos.                                   |
| 5                             | Mapa de riesgos - AHP                                                      | <b>Título:</b> Managing project risk using combined analytic hierarchy process and risk map<br><b>Autores:</b> Prasanta Kumar Dey<br><b>Año:</b> 2010                                                                | Es una herramienta gráfica que permite visualizar el impacto y probabilidad en una matriz, donde se asignan puntajes de 1 a 5 para cada riesgo. Al realizar la multiplicación del impacto y la probabilidad, el riesgo se ubica dentro de la matriz y se identifican los riesgos críticos en el nivel superior del mapa. Esta se combina con el juicio de expertos mediante AHP.                      |
| 6                             | RFMEA FUZZY                                                                | <b>Título:</b> Risk prioritization in failure mode and effects analysis under uncertainty<br><b>Autores:</b> Zaifang Zhang y Xuening Chu<br><b>Año:</b> 2010                                                         | RFMEA con elementos fuzzy para validar la fiabilidad humana                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |

Fuente: Elaboración propia.

Se decidió implementar como herramienta de cualificación el RFMEA ya que es una herramienta que rompe con el enfoque tradicional en administración de riesgos. Pues además de considerar la probabilidad e impacto, se tiene en cuenta la probabilidad de detección. Resaltando de mejor manera, los riesgos que hacen más vulnerable al proyecto. Los beneficios del RFMEA incluyen un aumento en la concentración sobre los riesgos más relevantes, contribuye a un plan de contingencia basado en los riesgos principales, el mejoramiento en participación del equipo del proyecto en la administración de riesgos y el efectivo control de los riesgos (Carbone y Tippet, 2004).

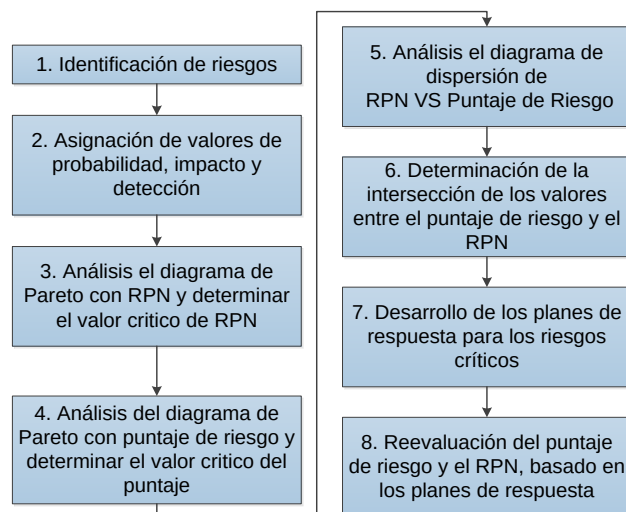
Se contempló que dado el alcance del estudio, no eran necesarias herramientas estadísticas como el índice relativo de importancia, el Spearman Rank o el Cronbach Alpha, ya que estos métodos involucran el análisis estadístico de una gran muestra de entrevistas desde diversos puntos de vista (contratistas, dueños de proyecto, etc), donde el objetivo es cotejar

todas las calificaciones para concluir análisis homogéneos. Lo anterior, hace inaplicables a estas técnicas ya que el presente proyecto de grado gira en torno a un único proyecto, en el marco específico de la Universidad del Valle, lo que reduce significativamente el número potencial de expertos a consultar, imposibilitando la utilización de estas técnicas basadas en encuestas con un gran tamaño de muestras. Por otro lado, no se consideró la idea de utilizar métodos como el Scoring por Significancia en Retraso ya que solo tiene en cuenta de manera implícita el impacto del riesgo en la duración del proyecto. Por su parte, la herramienta de Mapa de Riesgos no se consideró para su aplicación pues solo toma en cuenta la probabilidad y el impacto de los riesgos. De la misma forma, se descartó el RFMEA difuso ya que para la culminación de los objetivos del proyecto de grado se excedía en complejidad. De esta manera, se determinó que la herramienta que mejor se amolda al presente estudio es el RFMEA.

### 5.3.2. Descripción del Análisis de Modo y Efectos de Falla de Riesgos de Proyectos (Project Risk - Failure Mode and Effects Analysis, RFMEA)

Según Carbone y Tippet (2004), la herramienta RFMEA se concentra en priorizar los riesgos para la posterior acción con planes de contingencia. La relevancia de los riesgos se determina por el RPN o "Risk Priority Number" que significa el número de prioridad del riesgo, el cual es la multiplicación de la probabilidad de ocurrencia del riesgo, el impacto en los objetivos del proyecto como costo, alcance y calidad, y el valor de detección del riesgo, como nueva variable, la cual tiene como objetivo evaluar la vulnerabilidad del proyecto ante los riesgos identificados. Esta herramienta sigue un proceso de 8 pasos (Figura 5.4). Es relevante indicar que el RFMEA propuesto por estos autores lo incluyen como herramienta de cuantificación y respuesta de los riesgos, lo que para el estudio realizado solo se toma en cuenta como herramienta de cualificación.

Figura 5.4. Proceso del RFMEA.



Fuente: Traducido y adaptado de, Carbone y Tippet (2004).

El RFMEA es introducido durante las reuniones de planeación del equipo, utilizando las plantillas como se requieran y modificándolo según el proyecto. Estas modificaciones pueden incluir la adición de detalles, ajustando los porcentajes para las ponderaciones, aplicando valores específicos de tiempo y moneda, y adicionando distintos aspectos que se consideren relevantes. Este método consta de ocho pasos:

#### 1. Identificación de Riesgos:

Es el proceso de identificar los eventos o factores que afecten el desarrollo normal de las actividades y perjudiquen el logro de alguno de los objetivos del proyecto. En el caso particular del RFMEA propuesto por Carbone y Tippet (2004) se recomienda que el evento se describa específicamente al igual que sus impactos y que estos eventos se identifiquen por medio de tormenta de ideas entre los miembros del equipo del proyecto.

#### 2. Asignación de valores de probabilidad, impacto y detección:

Es el proceso en el cual se califican los factores de riesgo en términos de probabilidad, impacto y detección, estos valores son asignados por medio de consulta de expertos, las cuales son una guía y están sujetas a cambios según el ambiente del proyecto, (Graves, 2000) citado por Carbone y Tippet (2004). Para cada estimación se deben definir valores de 1 a 10 teniendo en cuenta la descripción y las escalas mostradas en las Tablas 5.3, 5.4, y 5.5.

Tabla 5.3. Escalas para estimar la probabilidad de ocurrencia.

| Valor  | PROBABILIDAD                       |
|--------|------------------------------------|
| 9 o 10 | Es muy probable que ocurra         |
| 7 o 8  | Probablemente ocurra               |
| 5 o 6  | Igual probabilidad que ocurra o no |
| 3 o 4  | Probablemente no ocurra            |
| 1 o 2  | Muy improbable                     |

Fuente: Traducido y adaptado de, Carbone y Tippet (2004).

Tabla 5.4. Escalas para estimar el impacto en costo, tiempo y calidad.

| Valor  | COSTO                                                     | TIEMPO                                                                     | CALIDAD                                                                                  |
|--------|-----------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|
| 9 o 10 | El costo total del proyecto aumenta más del 20%           | Impacto mayor en un hito y un impacto mayor del 20% a la ruta crítica      | El efecto en el alcance cambia el entregable del proyecto y no es útil al cliente        |
| 7 o 8  | El costo total proyecto aumenta entre el 10% y el 20%     | Impacto mayor en un hito y un impacto entre el 10% - 20% a la ruta crítica | El efecto en el alcance cambia el entregable del proyecto y puede no ser útil al cliente |
| 5 o 6  | El costo total del proyecto aumenta entre el 5% y el 10%  | Impacto entre el 5% y el 10% a la ruta crítica                             | Los efectos del cambio deben ser aprobados por el cliente                                |
| 3 o 4  | El costo total del proyecto no excede el 5%               | Impacto menor del 5% a la ruta crítica                                     | El efecto es menor pero requiere ser aprobado internamente o por el cliente              |
| 1 o 2  | El costo del proyecto incrementa de manera insignificante | El impacto es inapreciable                                                 | Los cambios no son perceptibles                                                          |

Fuente: Traducido y adaptado de Carbone y Tippet (2004).

Tabla 5.5. Escala para estimar el valor de detección.

| Valor  | DETECCIÓN                                                                                                                                           |
|--------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 9 o 10 | No existe un método de detección disponible o conocido que proporcione un aviso con suficiente tiempo para planificar para un plan de contingencia. |
| 7 o 8  | El método de detección no es probado o no es confiable, la eficacia del método de detección es desconocida para detectar a tiempo.                  |
| 5 o 6  | El método de detección tiene una efectividad media                                                                                                  |
| 3 o 4  | El método de detección tiene una alta efectividad                                                                                                   |
| 1 o 2  | El método de detección es altamente efectivo y es casi seguro que el riesgo será detectado con un tiempo adecuado                                   |

Fuente: Traducido y adaptado de Carbone y Tippet (2004).

Es importante aclarar las definiciones de dichos elementos de evaluación como por ejemplo:

- Probabilidad de ocurrencia: Es el valor más probable de que el riesgo ocurra.
- Impacto en costo, tiempo y calidad: Es el efecto en los objetivos del proyecto si el riesgo ocurriese.



- Valor de detección: La capacidad de la técnica de detección o los métodos para detectar el riesgo con el tiempo suficiente para planificar la contingencia y actuar sobre el riesgo.

### 3. Análisis del diagrama de Pareto con RPN y determinación del valor crítico de RPN

Una vez que se introducen los valores de los tres factores, se deben calcular el Puntaje del Riesgo que es la multiplicación de la probabilidad e impacto y el RPN que es la multiplicación de la probabilidad, impacto y el valor de detección. El tercer paso es graficar el diagrama de Pareto con RPN para determinar el valor crítico del RPN. Definir un valor estándar para todos los proyectos no es habitual, por lo que no es recomendado tampoco por el RFMEA. Un valor del RPN dado en un proyecto puede considerarse moderado mientras que en otro proyecto puede ser importante, por lo que a medida que cada proyecto es único, también son únicos los valores de RPN. Por lo tanto el análisis del Pareto es un paso crítico para determinar el valor a usar.

### 4. Análisis del diagrama de Pareto con Puntaje de Riesgo y determinación del valor crítico del puntaje

En cuarto lugar, se genera un Pareto similar para las Puntaciones del Riesgo (multiplicación de la probabilidad e impacto) y un valor crítico es determinado. No existe una regla para la selección de los valores críticos, en algunos casos la elección es obvia, en otros que la distribución es uniforme la decisión puede ser más difícil. Se debe tener en cuenta que esto es un simple punto de partida, pues los valores críticos ofrecen orientación para la planificación de respuesta a los riesgos priorizados.

Estos valores críticos representan el punto donde los riesgos se hacen más relevantes en términos de su probabilidad, impacto y detección, para el caso del RPN.

Estos valores varían según el experto debido a su propia calificación. Cada experto tiene un grado de opinión distinto que el otro, lo cual significa que la definición de los riesgos más relevantes está supeditada no solo a la escala general de evaluación sino a la inherente forma de calificación del experto.

### 5. Análisis el diagrama de dispersión de RPN Vs Puntaje de Riesgo

Después que estos valores críticos son conocidos para ambos casos, tanto para el RPN como para el puntaje de riesgo. El quinto paso es construir un diagrama de dispersión entre estos.

### 6. Determinación de la intersección de los valores entre el puntaje de riesgo y el RPN

El objetivo de la etapa seis es encontrar la intersección de los dos valores críticos para definir los riesgos prioritarios para el plan inicial de respuesta. En esta etapa se puede entender que el peor riesgo sería aquel con alta probabilidad de ocurrencia, alto impacto

sobre el proyecto y una baja probabilidad de detección. En el otro extremo, el riesgo menos significativo sería aquel que tiene baja probabilidad de ocurrencia, bajo impacto y una alta probabilidad de detección.

#### 7. Desarrollo de los planes de respuesta para los riesgos críticos

Después de identificar los riesgos críticos, en el séptimo paso el equipo debe considerar estrategias de respuesta al riesgo, tales como evasión, transferencia, mitigación y aceptación y documentar dichos planes.

#### 8. Reevaluación el puntaje de riesgo y el RPN basado en los planes de respuesta

A raíz de la planificación de la respuesta, la etapa final es volver a calcular la puntuación del riesgo y el RPN basado en las acciones del plan de respuesta esperado. Así si el número recalculado del RPN no cae por debajo del valor crítico se debe entonces revisar el plan de respuesta, mejorar los métodos de detección o aceptar el riesgo.

### **5.3.3. Aplicación del RFMEA a los riesgos de programa identificados en la Universidad del Valle**

En este proyecto de grado, se utilizó la técnica de calificación cualitativa “Project RFMEA” (Carbone y Tippet, 2004) para obtener una primera síntesis de los riesgos en general en proyectos de construcción de la Universidad del Valle a ser modelados en el análisis cuantitativo. La realización de este primer filtro cualitativo, es recomendado por instituciones como el PMI (2008) en sus esquemas de gestión de riesgo ya que para realizar un análisis numérico del efecto de los riesgos en un objetivo del proyecto es deseable trabajar sobre un conjunto de riesgos menor al obtenido en la identificación de riesgos. Lo anterior, debido a la usual complejidad de las técnicas utilizadas en los análisis cuantitativos, como es el caso de la Simulación Monte Carlo.

La aplicación de esta técnica a los riesgos identificados requiere la evaluación de expertos relacionados con el sector de la construcción en la Universidad del Valle. Por esta razón, se diseñó como primer paso un perfil de experto en el que se definieron las características y competencias necesarias para considerar a una persona como evaluador apto en la aplicación de la técnica.

Ya definido el perfil del experto, se diseñaron los formatos y el método de la entrevista para el levantamiento de datos. Seguidamente, una prueba piloto fue llevada a cabo para validar en su forma, características y resultados el comportamiento de la entrevista diseñada. A partir de estos resultados, se reformuló la técnica RFMEA cambiando las escalas numéricas de calificación cualitativa así como las definiciones asociadas a cada valor numérico. Fuera de esto, la lista de riesgos inicialmente obtenida en la identificación fue modificada de tal manera que se descartaron y añadieron riesgos a lista, pasando esta última de 65 a 55 riesgos.

Finalmente, se aplicó la técnica RFMEA con las modificaciones derivadas de la prueba piloto y se realizó el respectivo análisis de los resultados obtenidos a partir de la técnica, de este proceso, se obtuvieron los riesgos a ser evaluados posteriormente en el análisis cuantitativo.

### 5.3.3.1. Definición del Perfil del Experto

La definición del perfil se basó en la propuesta de Pérez y Borrero<sup>†</sup> (2012) y las sugerencias de la estudiante doctoral de ingeniería Industrial Sandra Liliana Cano Moya; sugerencias que se sustentan en su título profesional como ingeniera civil y la experiencia en el sector constructivo adquirida en el desempeño del cargo de directora de la Dirección de Administración de Bienes y Servicios de la Universidad del Valle. A partir de estos componentes, se definió el perfil de experto consignado en la Tabla 5.6.

Tabla 5.6. Perfil de Experto

| Definición del Perfil del experto |                                                                                           |
|-----------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|
| Formación:                        | Profesional en Arquitectura o Ingeniería Civil                                            |
| Conocimientos:                    | Dirección, diseño y ejecución de proyectos de construcción. Equipos y materiales de obra. |
| Experiencia:                      | Mínimo 3 años en el sector de la construcción en la Universidad                           |

Fuente: Elaboración propia.

### 5.3.3.2. Selección de Expertos

Para la aplicación del RFMEA, se seleccionaron cuatro expertos (Tabla 5.7) para la calificación cualitativa. Con el experto E0 se realizó una prueba piloto para identificar posibles falencias en la metodología definida por Carbone y Tippet (2004) y mejorar los vacíos que se pudieran encontrar. Posteriormente, se realizaron las entrevistas definitivas a los tres expertos restantes<sup>‡</sup>.

Tabla 5.7. Expertos seleccionados.

| EXPERTOS SELECCIONADOS |                                |                  |                                     |             |
|------------------------|--------------------------------|------------------|-------------------------------------|-------------|
| ID                     | Experto                        | Profesión        | Cargo                               | Experiencia |
| E3                     | Sandra Cano                    | Ingeniería Civil | Estudiante Doctoral Ing. Industrial | 10 años     |
| E2                     | Jorge Gómez                    | Arquitecto       | Profesional de Planeación Física    | 10 años     |
| E1                     | Gilberto García                | Arquitecto       | Director de Mantenimiento           | 10 años     |
| E0                     | Martha Vanegas (Prueba Piloto) | Arquitecta       | Supervisora de Obra                 | 3 años      |

Fuente: Elaboración propia.

<sup>†</sup> En el proyecto de grado “Análisis del riesgo de programa en el sector de la construcción para determinar su impacto en la duración de los proyectos. Caso de estudio: proyecto de vivienda en Cali”.

<sup>‡</sup> Según Arquer (2007), la opinión de tres expertos es una medida aceptable para obtener un juicio de alguna variable de estudio

#### **5.3.3.3. Diseño de entrevista**

Las características de la técnica RFMEA obligan a que la entrevista permita consolidar la valoración cualitativa del experto sobre la importancia de un determinado riesgo frente a los factores de éxito de un proyecto<sup>§</sup>. Importancia medida en términos de la probabilidad de ocurrencia del riesgo, el impacto sobre el objetivo a evaluar del proyecto y la posibilidad de detección del riesgo. Para registrar estas calificaciones, se diseñó un formato de entrevista con los 65 riesgos del Anexo 1 y tres columnas adicionales para calificar las características de interés.

Fuera de esto, se plantearon para la entrevista los siguientes pasos metodológicos:

1. Introducción del proyecto de grado especificando los objetivos, las etapas y el alcance del mismo, lo anterior, para contextualizar al experto y resaltar la importancia del estudio.
2. Explicación concisa sobre la técnica RFMEA y las tablas de ponderaciones a utilizar y su significado, (Ver apartado 5.3.2).
3. Entrega al experto de la lista de riesgos y las tablas de ponderaciones.
4. Explicación y registro de la calificación para cada riesgo en términos de la probabilidad, el impacto y la detección; el registro se realiza directamente en una hoja de cálculo.
5. Cálculo del RPN (las formulas de la hoja de cálculo están listas con anterioridad) y ordenación de mayor a menor de los riesgos con respecto a este indicador. Esto se realiza inmediatamente se concluye la calificación del experto para validar si los riesgos más relevantes a consideración del experto se encuentran dentro de los diez primeros, si considera que los riesgos que observa son definitivamente los más importantes entonces se concluye la entrevista, de lo contrario, se procede a redefinir los valores que el experto considere justo cambiarlos ya sean de probabilidad, impacto o detección. Lo anterior, permite al experto considerar cada uno de los riesgos y que al pensar la calificación de cada uno de ellos se fomente una respuesta mejor elaborada, lo que no podría lograrse preguntando directamente por los riesgos más importantes.

#### **5.3.3.4. Validación de entrevista (Prueba Piloto)**

La metodología de la entrevista y la herramienta RFMEA se validaron mediante una prueba piloto con el experto E0 (Tabla 5.7). De este ejercicio, se observaron varias falencias en la metodología. En primer lugar, la escala estándar de 1 a 10, propuesta por Carbone y Tippet (2004) generó ambigüedades en las calificaciones del experto debido a su excesiva amplitud, fuera de esto, el significado de los valores definidos para las escalas de impacto y detección generaron confusiones en su interpretación.

---

<sup>§</sup> La estructura básica propuesta por Carbone y Tippet (2004) considera la evaluación de las dimensiones de costo, tiempo y calidad; sin embargo, en este proyecto de grado solo se califica el impacto con respecto a la dimensión del tiempo debido a que los riesgos del presente estudio están limitados a este único componente.

El origen de las confusiones se identificó en las definiciones de las escalas basadas en variaciones porcentuales de la duración total del proyecto, como por ejemplo, “impacto mayor al 20%” (Tabla 5.4). Este tipo de significado en la escala provocó que el experto calculara el impacto de los riesgos pensando en un caso específico (algún proyecto realizado anteriormente) perdiendo de esta manera la visión general desde la que se buscaba evaluar los riesgos. Este mismo problema se presentó al calificar probabilidad de detección.

Debido a lo anterior, se planteó una adaptación del RFMEA, con el objetivo de eliminar las debilidades identificadas y simplificar el desarrollo de la entrevista.

#### 5.3.3.5. Adaptación RFMEA

El RFMEA propuesto por Carbone y Tippet (2004), indica que el proceso de cualificación del riesgo debe tener en cuenta los planes de respuesta, lo anterior, no se toma en consideración para la aplicación del RFMEA en este proyecto ya que los planes de respuesta están por fuera del alcance planteado para este proyecto.

Fuera de esto, como el RFMEA original busca evaluar los riesgos para un proyecto en específico y en esta fase del presente proyecto se busca evaluar los riesgos de manera general, se cambiaron las escalas numéricas y los significados por las de las Tablas 5.8, 5.9 y 5.10. Al cambiar las escalas a una interpretación general se permite el normal transcurso de las entrevistas, lo que no es posible utilizando porcentajes como originalmente lo plantearon Carbone y Tippet (2004).

Tabla 5.8. Escalas para estimar la probabilidad de ocurrencia.

| PROBABILIDAD                     | CALIFICACIÓN |
|----------------------------------|--------------|
| Es muy probable que ocurra       | 5            |
| Probablemente ocurra             | 4            |
| Probabilidad media de ocurrencia | 3            |
| Probablemente no ocurra          | 2            |
| Muy improbable que ocurra        | 1            |

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 5.9. Escalas para estimar el impacto en tiempo.

| IMPACTO                                          | CALIFICACIÓN |
|--------------------------------------------------|--------------|
| El tiempo del proyecto aumenta en gran medida    | 5            |
| El tiempo del proyecto aumenta considerablemente | 4            |
| El tiempo del proyecto aumenta moderadamente     | 3            |
| El tiempo del proyecto aumenta                   | 2            |
| El impacto es inapreciable                       | 1            |

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 5.10. Escala para estimar el valor de detección.

| DETECCIÓN                                                                 | CALIFICACIÓN |
|---------------------------------------------------------------------------|--------------|
| No se puede detectar el riesgo ni anticiparlo con un plan de contingencia | 5            |
| Difícilmente se puede detectar el riesgo                                  | 4            |
| Se puede detectar el riesgo de manera media                               | 3            |
| Se puede detectar el riesgo de manera moderada                            | 2            |
| Se puede detectar el riesgo                                               | 1            |

Fuente: Elaboración Propia.

Finalmente, la lista de riesgos inicialmente obtenida en la identificación fue modificada de tal manera que se descartaron 10 riesgos de la lista según las consideraciones del experto E0, pasando esta última de 65 a 55 riesgos. La descripción detallada de los riesgos descartados por el experto E0 se consigna en la Tabla 5.11. El riesgo 17 y 24 fueron descartados al estar incluidos en el riesgo 32 del Anexo 2, de la misma forma, el riesgo 26 y el 62, se consideran incluidos en los riesgos 45 y 10 del Anexo 2, respectivamente. Por su parte, el riesgo 36 no es aplicable al no utilizar en el contexto de los POC materiales especiales y los riesgos 38, 49, 51 y 64 se descartan al no presentarse en el contexto particular de la Universidad, todo lo anterior según las consideraciones del experto.

Como resultado final de esta evaluación se logró consolidar la lista de riesgos identificados que finalmente fue evaluada con la técnica RFMEA (Anexo 2).

Tabla 5.11. Riesgos descartados en la Prueba Piloto.

| ID | RIESGOS DESCARTADOS                                                                                                                                                        |
|----|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 17 | Proteccionismo local (Medio ambiente)                                                                                                                                      |
| 24 | Problemas con las vecindades                                                                                                                                               |
| 26 | Fallas de comunicación entre el interventor y el contratista                                                                                                               |
| 36 | Retrasos en la manufactura de materiales especiales de construcción                                                                                                        |
| 38 | Efectos del clima caliente en las actividades de construcción                                                                                                              |
| 49 | Retraso en el retiro de material desinstalado en obra y que no está a cargo del contratista su retiro                                                                      |
| 51 | No ejecución de la actividad contratada en la propuesta ofertada, por omisión de componentes necesarios para desarrollar la actividad correctamente para su funcionamiento |
| 52 | Incumplimiento en el pago de obligaciones laborales y honorarios                                                                                                           |
| 62 | Tecnología obsoleta                                                                                                                                                        |
| 64 | Pobre uso de software avanzado de ingeniería                                                                                                                               |

Fuente: Elaboración Propia.

### 5.3.3.6. Entrevistas

Las entrevistas se realizaron de forma presencial, siguiendo el orden metodológico propuesto en el diseño de la entrevista y las escalas postuladas en la adaptación. Estas entrevistas presentaron una duración de aproximadamente dos horas por cada experto.

### 5.3.3.7. Aplicación del RFMEA Adaptado

#### *Identificación de riesgos*

El proceso de identificación de riesgos se realizó en el apartado 5.1 resultando en una lista de 65 riesgos; sin embargo, la lista de riesgos evaluados con la técnica RFMEA son los resultantes de la prueba piloto registrados en el Anexo 2.

#### *Asignación de calificaciones de valores de probabilidad, impacto, y detección*

Se puede observar en la Tabla 5.12 los puntajes máximos del RPN y el Puntaje de Riesgo, estos resultados muestran que tan severo fue un determinado experto al evaluar los riesgos, tomando en cuenta que los puntajes máximos para el RPN con la calificación propuesta son de 125 y del puntaje de riesgo 25. Esto evidencia las diferencias que existen en la severidad de las opiniones de cada especialista; sin embargo, se busca un balance utilizando el promedio de las calificaciones.

Tabla 5.12. Resumen de puntajes máximos en la evaluación de los expertos.

|                               | E1  | E2 | E3  | Valores Promedio |
|-------------------------------|-----|----|-----|------------------|
| <b>RPN MAX</b>                | 100 | 64 | 125 | 80,89            |
| <b>RPN MIN</b>                | 1   | 1  | 1   | 1,78             |
| <b>Puntaje del Riesgo MAX</b> | 20  | 20 | 25  | 20,22            |
| <b>Puntaje del Riesgo MIN</b> | 1   | 1  | 1   | 1,33             |

Fuente: Elaboración propia.

Los valores obtenidos para la probabilidad, impacto y detección en las entrevistas con los expertos se promediaron para cada riesgo. A partir de estos datos, se calculó el “Número de prioridad del riesgo (RPN)” y el Puntaje del Riesgo.

Es decir, para un determinado riesgo se calcula la calificación de cada componente (Probabilidad, Impacto, Detección) como el promedio de las calificaciones dadas por los expertos. Por ejemplo, si para el riesgo i los tres expertos aportaron calificaciones de 3, 4 y 5 al componente de probabilidad, la valoración promedio para el riesgo i en el componente de probabilidad es de 4, procedimiento que se replica para los otros dos componentes. Ya teniendo las valoraciones promedio de cada componente para cada riesgo se calcula el RPN y el Puntaje del Riesgo a partir de estos valores.

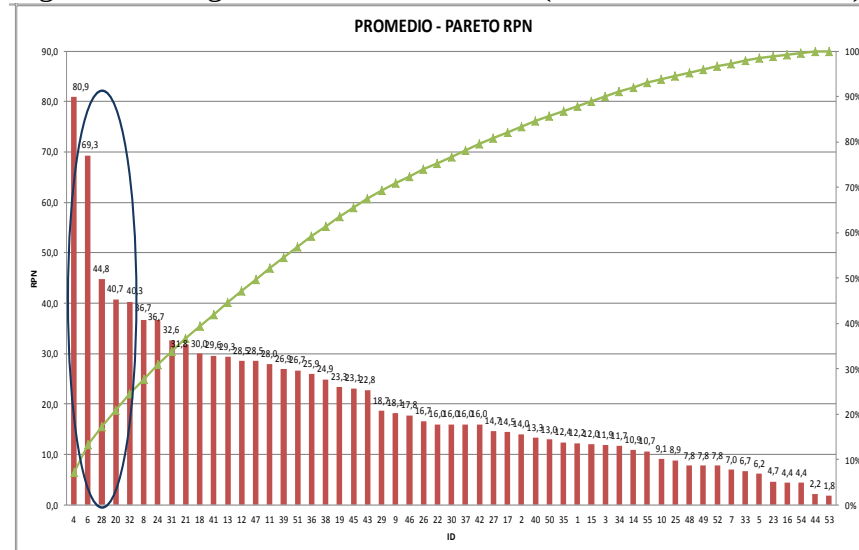
### **Análisis de los Diagramas de Pareto del RPN y del puntaje de riesgo y determinación de los valores críticos**

La técnica RFMEA propuesta por Carbone y Tippet (2004) postula que es a partir del cruce del RPN y el Puntaje de Riesgo en un diagrama de dispersión puede ser determinada la criticidad o grado de importancia de los riesgos evaluados desde el criterio cualitativo. Por lo anterior, la técnica señala que se deben definir los “valores críticos” tanto para el RPN como para el Puntaje de Riesgo.

Estos “valores críticos” son la medida de referencia desde la que se puede discriminar si un determinado riesgo es significativamente importante según el valor obtenido en los indicadores RPN y Puntaje de Riesgo. Para el caso puntual de las distribuciones del RPN (Figuras 5.5) y el Puntaje de riesgo (Figuras 5.6) se determinaron los valores críticos de manera empírica a partir de la observación de las distribuciones y atribuyendo el valor crítico al punto en el que se pudiera observar una separación entre los riesgos con mayor calificación y los del resto de la distribución, estas separaciones son las resaltadas con círculos en las distribuciones.

La construcción del diagrama de Pareto del RPN y del diagrama de Pareto del Puntaje de Riesgo se realizó para las calificaciones de cada experto<sup>\*\*</sup> y para la valoración promedio (Ver Figuras 5.5 y 5.6). Por su parte, los valores de los puntos críticos determinados para cada distribución se registran en la tabla 5.13.

Figura 5.5. Diagrama de Pareto del RPN (Valoraciones Promedio).

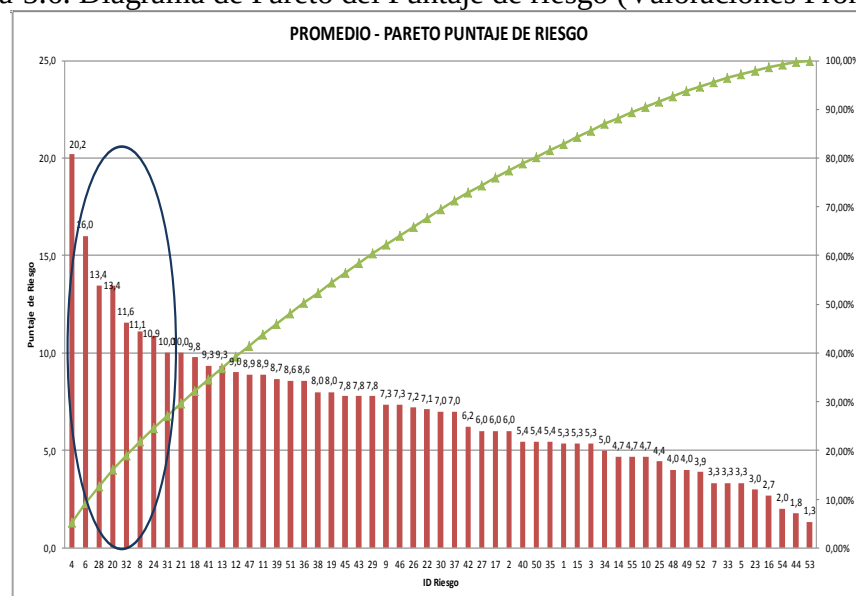


Fuente: Elaboración propia.

<sup>\*\*</sup> Diagramas que se pueden observar en los archivos de soporte incluidos en la versión digital del presente proyecto.



Figura 5.6. Diagrama de Pareto del Puntaje de riesgo (Valoraciones Promedio).



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5.13. Puntajes críticos RPN y Puntaje de riesgo.

| Puntaje Crítico   | E1 | E2 | E3 | Promedio |
|-------------------|----|----|----|----------|
| RPN               | 45 | 36 | 60 | 40       |
| Puntaje de Riesgo | 10 | 12 | 15 | 10       |

Fuente: Elaboración propia.

Del comportamiento de las distribuciones observadas, se determina que aproximadamente el 55% de los riesgos identificados y evaluados representan el 80% del valor acumulado obtenido para los dos indicadores del RFMEA, es decir, los riesgos más relevantes en términos del impacto generado en la programación de las obras civiles.

Esto indica, que para los expertos hay una gran cantidad de riesgos que influyen en los retrasos en las obras y que a pesar de que a su criterio algunos riesgos puedan considerarse más importantes que otros, no es evidente del análisis individual de las distribuciones de Pareto una explicación “80% del comportamiento es atribuible al 20% de los factores”; comportamiento que se extiende a todos los diagramas de Pareto construidos a partir de las calificaciones de cada experto para los indicadores RPN y puntaje de riesgo.

Por lo anterior, se puede afirmar que se presenta un alto grado de subjetividad en la determinación de los valores críticos, inconveniente que debe ser abordado con técnicas estadísticas de mayor robustez que la observación directa de los diagramas de Pareto como lo postula Carbone y Tippet (2004); sin embargo, los autores consideran una aproximación practica para el presente proyecto los valores determinados en la Tabla 5.13.

### ***Construcción el diagrama de dispersión entre el RPN vs Puntaje de riesgo***

El diagrama de dispersión permite visualizar el estado de los riesgos en términos de sus calificaciones de probabilidad, impacto y detección. Dicho estado, puede clasificarse en cuatro escenarios:

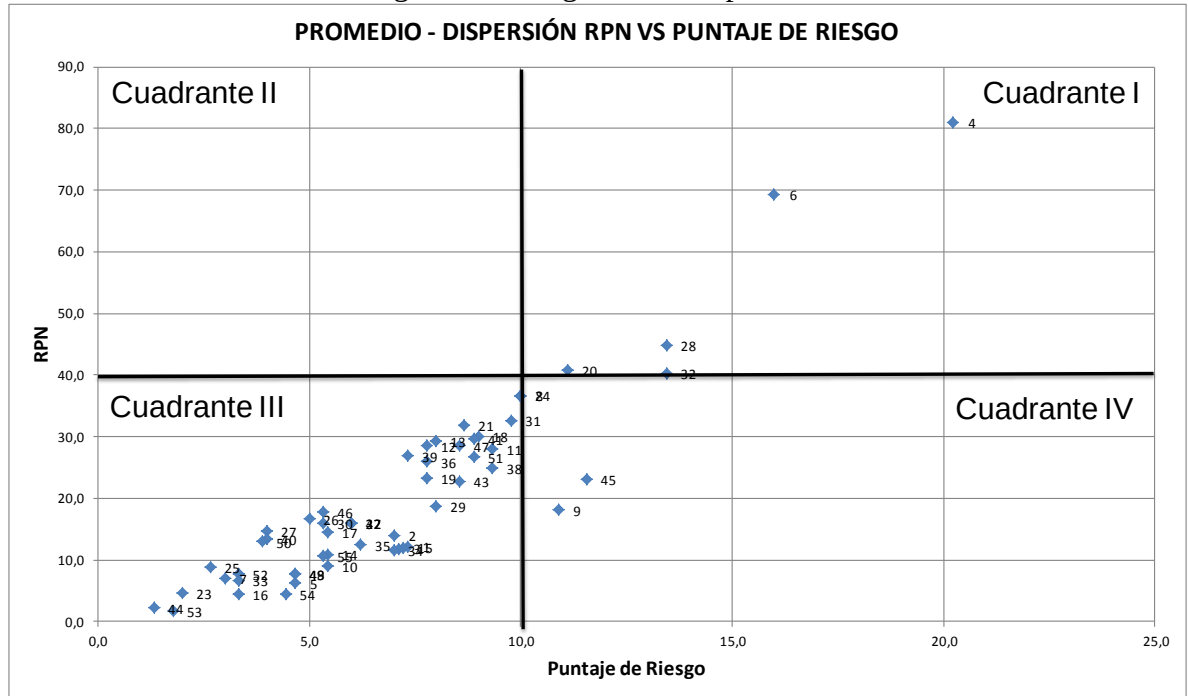
- En el primer escenario, los riesgos presentan una alta calificación de probabilidad, impacto y detección.
- El segundo escenario, es donde los riesgos tienen una baja calificación de probabilidad e impacto, pero un alto valor de detección.
- El tercer escenario es en el cual los riesgos tienen una baja calificación de probabilidad, impacto y detección.
- El cuarto escenario es aquel en que los riesgos tienen un estado de alta probabilidad e impacto pero una calificación baja de detección.

Los riesgos más relevantes están ubicados en el primer y cuarto escenario, ya que consideran los riesgos con más probabilidad de ocurrencia e impacto en el proyecto y que además pueden o no ser detectados con facilidad.

Cada escenario es representado por un cuadrante en el diagrama que depende de la intersección de los puntajes críticos definidos con antelación en el análisis de los diagramas de Pareto (Tabla 5.13).

En general, esta intersección representa el punto a partir del cual los riesgos se consideran más importantes y permite dividir el diagrama en cuatro cuadrantes, mostrando de esta manera el estado de cada riesgo; cada uno de los cuadrantes se relaciona con su respectivo escenario en numeración, es decir, el cuadrante uno representa el escenario uno y así sucesivamente (Figura 5.7).

Figura 5.7. Diagrama de dispersión.



Fuente: Elaboración propia.

El comportamiento del diagrama de dispersión de la Figura 5.7 destaca una posible correlación entre el RPN y el Puntaje de Riesgo, esto sugiere que a consideración de los expertos los riesgos con alto impacto y alta probabilidad de ocurrencia también tienen una baja posibilidad de detección (lo cual representa una calificación alta en el componente de detección).

Fuera de esto, al revisar los diagramas de dispersión para cada calificación de cada experto y del promedio se obtuvo la cantidad de riesgos en cada cuadrante (Tabla 5.14). De este registro se observa un comportamiento generalizado para todas las calificaciones en el que más del 80% de los riesgos se encuentran en el cuadrante tres, representando los riesgos menos importantes, y tan solo entre el 9% y el 15% de los riesgos se encuentran en el cuadrante uno, representando los riesgos más relevantes.

Tabla 5.14. Número de riesgos ubicados por cuadrante.

| Cuadrante | E1 | E2 | E3 | Valores Promedio |
|-----------|----|----|----|------------------|
| 1         | 6  | 8  | 7  | 5                |
| 2         | 1  | 0  | 0  | 0                |
| 3         | 48 | 43 | 45 | 48               |
| 4         | 0  | 4  | 3  | 2                |

Fuente: Elaboración propia.

Es de particular interés observar que no se encontraron riesgos en el cuadrante dos a excepción de tan solo uno en la calificación del experto uno, y menos de cuatro en el cuadrante cuatro para todas las calificaciones.

Seguidamente, se procedió a analizar los riesgos, por identificador (ID), ubicados en el cuadrante uno para cada calificación, riesgos que se observan en la Tabla 5.15.

Tabla 5.15. Riesgos identificados en el cuadrante uno.

| <b>Riesgos (ID) – Cuadrante 1</b> |           |           |                         |
|-----------------------------------|-----------|-----------|-------------------------|
| <b>E1</b>                         | <b>E2</b> | <b>E3</b> | <b>Valores Promedio</b> |
| 4                                 | 6         | 18        | 4                       |
| 6                                 | 29        | 31        | 6                       |
| 8                                 | 41        | 32        | 28                      |
| 19                                | 4         | 4         | 20                      |
| 28                                | 39        | 43        | 32                      |
| 2                                 | 21        | 47        | -                       |
| -                                 | 28        | 6         | -                       |
| -                                 | 38        | -         | -                       |

Fuente: Elaboración Propia.

Los riesgos del cuadrante uno para cada experto se compararon entre sí con el objetivo de encontrar riesgos en común. De esta comparación solamente se identificaron dos riesgos que coincidieron en el cuadrante uno para cada experto. Estos riesgos corresponden a los identificados con el número cuatro y seis.

Fuera de esto, los resultados de la Tabla 5.15 exponen un particular comportamiento en el cual los riesgos identificados como los más importantes según el promedio de las calificaciones no coinciden en plenitud con los riesgos catalogados como los más importantes por cada experto.

Esto quiere decir, que en los riesgos derivados de la calificación promedio, se encontró un riesgo que ni siquiera fue catalogado como relevante para ningún experto. Por otro lado, algunos de los riesgos más importantes para los expertos no quedaron en el cuadrante uno del promedio. Este comportamiento se debe a que el promedio estabiliza todas las calificaciones, y genera una medida central para todas ellas, dejando por fuera algunos riesgos que para un experto fueron calificados con valores altos pero para otros no.

Para compensar este hecho se decidió considerar los tres primeros riesgos más importantes de cada experto y todos los riesgos del cuadrante uno de la calificación promedio. De esta manera, se tienen en cuenta los riesgos más importantes según el promedio de las calificaciones y los que son de gran relevancia para cada experto.

A partir de este proceso se obtuvo la lista definitiva de los riesgos que serán evaluados en el análisis cuantitativo de riesgos (Ver tabla 5.16).

Tabla 5.16. Lista de riesgos más importantes desde calificación cualitativa.

| <b>ID</b> | <b>Descripción</b>                                                                         |
|-----------|--------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>4</b>  | Retraso en el desarrollo de la obra por inconsistencias o falta de claridad en los diseños |
| <b>6</b>  | Problemas técnicos imprevistos en construcción                                             |
| <b>28</b> | Condiciones del terreno imprevistas                                                        |
| <b>20</b> | Suspensión del trabajo por parte del contratante                                           |
| <b>32</b> | Retrasos en resolver disputas con partes interesadas                                       |
| <b>8</b>  | Dificultades financieras de contratistas                                                   |
| <b>29</b> | Efectos del clima lluvioso en las actividades de construcción                              |
| <b>41</b> | Retrasos - Incumplimiento de subcontratistas                                               |
| <b>18</b> | Tomas de decisiones lentas del dueño del proyecto                                          |
| <b>31</b> | Retrasos en resolver los problemas contractuales                                           |

Fuente: Elaboración propia.

## **6. CARACTERIZACIÓN DE LAS ESTRUCTURAS METODOLÓGICAS DE ANÁLISIS CUANTITATIVO DE RIESGOS BASADAS EN SIMULACIÓN MONTE CARLO**

El análisis de riesgo cuantitativo basado en la SMC es usado para el desarrollo de modelos estadísticos y simulaciones, que tienen como objetivo obtener resultados numéricos que muestren los efectos de los riesgos (Öztaş y Ökmen, 2005). Esto quiere decir que dichos métodos consisten en determinar el impacto de los riesgos identificados por la realización de corridas de simulación con el objetivo de identificar el rango de posibles resultados para una serie de escenarios.

El proceso de análisis cuantitativo de riesgos ha venido evolucionando a través del tiempo tratando de acercarse más a la modelación de la realidad. Según Wang y Demsetz (2000; Citado por Ökmen y Öztaş, 2008), en primera instancia algunos métodos de análisis de riesgo de programa como PERT, SMC, PNET son capaces de tomar la incertidumbre en cuenta, pero son incapaces de identificar la sensibilidad de las actividades por cuenta de los factores de riesgo. Estos métodos solo se aproximan al contexto de tomar las duraciones de las actividades dentro de un límite e intentar medir la variabilidad del tiempo total del proyecto (Ökmen y Öztaş, 2008). Dicha situación, ha mejorado debido al surgimiento de varios modelos de análisis cuantitativo de riesgos de programa los cuales tienen en cuenta los efectos favorables de los riesgos, la correlación entre actividades, análisis de las relaciones entre los riesgos y actividades, entre otros aspectos (Ökmen y Öztaş, 2008).

En este sentido se describen, comparan y analizan algunos métodos de Análisis Cuantitativo de Riesgos de Programa basados en la Simulación Monte Carlo que han ido evolucionando en el tiempo. Específicamente en la sección 6.1, 6.2, 6.3 y 6.4 se describen y detallan las estructuras metodológicas, en la sección 6.5, se realiza un resumen de las propiedades de cada estructura, y por último en la sección 6.6 se hace un análisis comparativo.

Es importante esclarecer que para el contexto, se considera una estructura metodológica como una serie de pasos y actividades, que hacen posible la aplicación de un modelo, el cual es una representación de los efectos de los riesgos.

También se aclara, que todas las metodologías de análisis cuantitativo de riesgos, están dentro de un sistema de gestión de riesgos, el cual incluye los procesos de identificación, cualificación, análisis y respuesta de riesgos. Cada estructura metodológica tiene un alcance definido dentro de dicho proceso.

### **6.1. Risk Analysis in Fixed-Price Design–Build Construction Projects**

Este trabajo fue publicado en el año 2004 por Ökmen y Öztaş, el cual comprende una investigación que combina la estimación estocástica del costo y la duración total de un

proyecto, utilizando técnicas de administración de proyectos y análisis cuantitativo del riesgo con SMC. Este estudio muestra la necesidad del proceso de análisis cuantitativo del riesgo en los procesos contractuales en la construcción específicamente en contratos de precio fijo donde el contratista es el diseñador y el constructor al mismo tiempo.

Los autores proponen un modelo de análisis de riesgos de programa y de costo, para demostrar su aplicabilidad y revelar los problemas que surgen por no tener en cuenta los riesgos en la estimación del programa y del costo a través de un caso de estudio, comparando el tiempo de terminación y los costos totales contractuales, estocásticos y reales.

Se plantea una estructura metodológica implícita para el análisis de riesgo de programa, la cual se resumen en los siguientes pasos.

1. Identificar los riesgos mediante consulta de expertos, revisión de cláusulas de contratos y documentos, etc.
2. Definir las características del proyecto como las actividades, las precedencias, simultáneamente aclarar el inicio del proyecto y los días no laborales.
3. Definir duraciones mínimas, más probables y máximas de las actividades, teniendo en cuenta los riesgos identificados, pues estos son agentes vitales para la predicción de estas duraciones.
4. Introducir el programa determinístico en el MS Project, para calcular la fecha de terminación y la duración del proyecto.
5. Llevar a cabo la simulación Monte Carlo en el MS Excel con las características de incertidumbre impuestas y los comandos del programa de análisis de riesgo de Crystal Ball, con el objetivo de obtener el programa estocástico del proyecto.
6. Analizar el programa determinístico vs el programa estocástico.

En esta primera aproximación de los autores, el análisis cuantitativo de los riesgos de programa lo resaltan como un análisis práctico y funcional debido a la información estocástica resultante de la duración del proyecto, el cual es crucial en procesos contractuales y de licitación. Aclaran que “la decisión de elegir qué nivel de confianza tomar para pactar la duración total del proyecto en el contrato, debe estar relacionada con la aversión al riesgo, la experiencia y la capacidad de identificación y respuesta a los riesgos del equipo del proyecto”.

Es importante resaltar que la SMC en esta metodología interviene directamente en el cálculo de las duraciones de las actividades del proyecto, debido a la distribución de probabilidad de cada actividad, esto quiere decir que los riesgos identificados son tenidos en cuenta indirectamente en la simulación ya que son los agentes que propician el cambio en las duraciones de las actividades.

## 6.2. Judgmental Risk Analysis Process (JRAP)

Öztaş y Ökmen (2005), proponen el Judgmental Risk Analysis Process (JRAP) como una metodología para Análisis Cuantitativo de Riesgos basada en Simulación Monte Carlo para proyectos de construcción; esta metodología, consiste en un número de pasos y una ecuación para definir la duración de cada una de las actividades de un programa.

Como la mayoría de los métodos de Análisis Cuantitativo de Riesgos de Programa busca dar respuesta a las siguientes preguntas (Öztaş y Ökmen, 2005): ¿En cuántos días y con cuanta probabilidad es posible completar el proyecto?, ¿Qué actividades son las más críticas, es decir, las que más hacen parte de la ruta crítica? y ¿Qué elementos de riesgo son los que más afectan la duración del proyecto?

Los autores plantean varios elementos de entrada a la metodología, los cuales son los riesgos principales que afectan a las actividades críticas del proyecto, las duraciones mínimas, más probables y máximas de las actividades, una distribución de probabilidad por cada factor de riesgo en términos de su probabilidad de ocurrencia, una matriz donde se definen las relaciones entre las actividades y los riesgos, y si es necesario otra matriz donde se definen las correlaciones entre los riesgos. Todos estos elementos se conjugan en la ecuación para calcular la duración de una actividad (Ver ecuación 1).

Ecuación 1. Ecuación para el cálculo de la duración de las actividades.

*Duración de la actividad =*

$$MAX[(Duración\ Mínima + Efecto\ del\ riesgo), (Duración\ Máxima - Efecto\ del\ riesgo)]$$

Ecuación 2. Ecuación para el cálculo del efecto de riesgo

*Efecto del riesgo =*

$$(Duración\ Máxima - Duración\ Mínima) \times \sum_{i=1}^N RF_i \times Num. Aleatorio_i$$

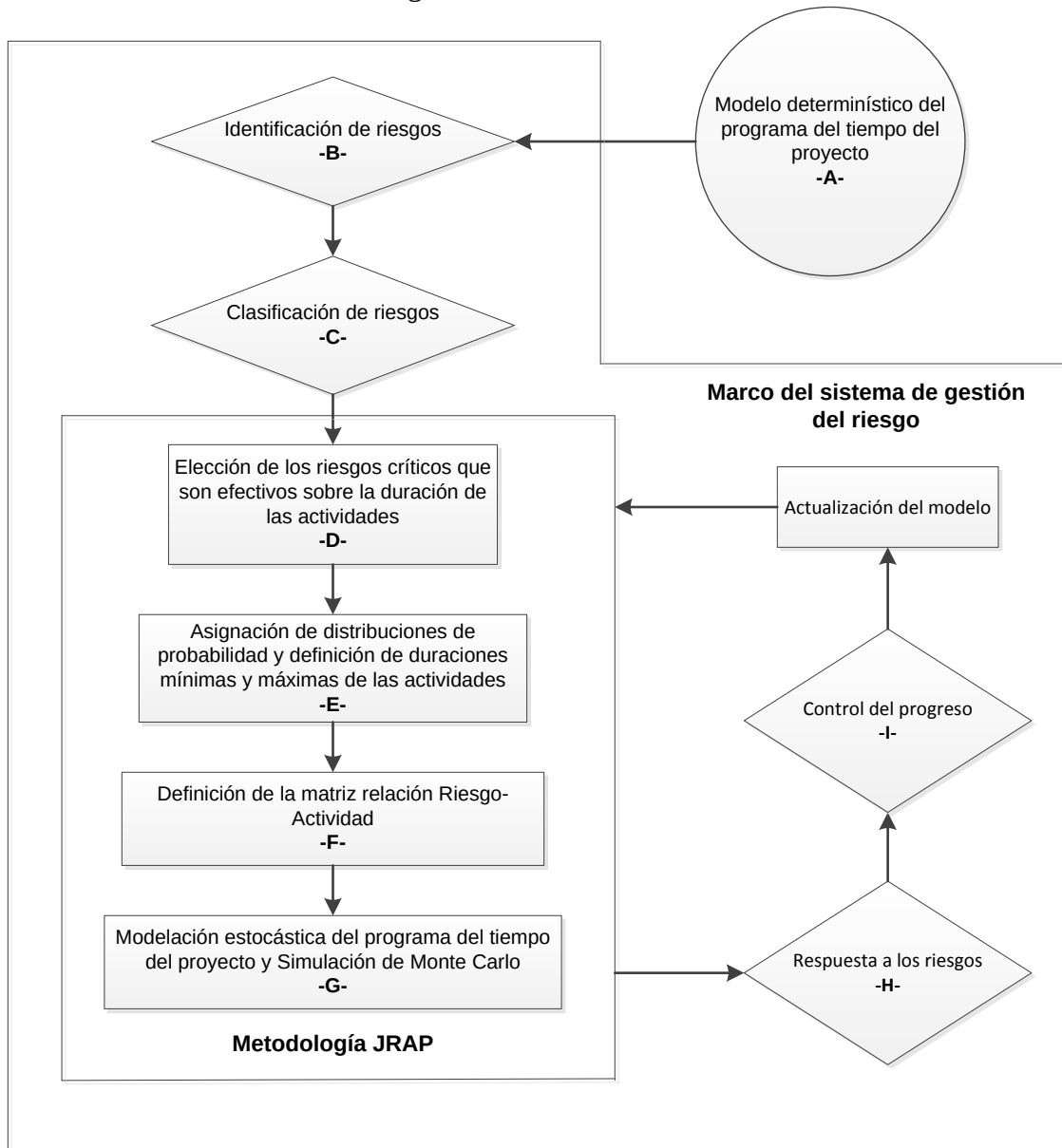
Donde  $RF_i$  es el porcentaje del efecto del riesgo  $i$  sobre una actividad y el  $Num. Aleatorio_i$  es un número aleatorio entre 0 y 1 generado durante la SMC, el cual está definido por la probabilidad del riesgo.

La ecuación uno representa una visión pesimista donde la duración de cualquier actividad siempre será como mínima la diferencia entre la duración máxima y mínima. Existe una relación inversamente proporcional entre el efecto del riesgo y la duración de la actividad, ya que menor efecto del riesgo, la duración será más cercana a la duración máxima de la actividad. En otras palabras los autores proponen que es mejor sobre estimar la duración de una actividad así el riesgo no genere un gran impacto sobre la misma en la simulación.



Para poner en práctica dicho concepto los autores describen una serie de pasos enmarcado dentro del sistema de gestión de riesgos como se muestra en la Figura 6.1 y en los pasos descritos posteriormente.

Figura 6.1. Pasos del JRAP.<sup>††</sup>



Fuente: Öztaş y Ökmen (2005).

Descripción de los pasos del JRAP:

<sup>††</sup> Los pasos de la metodología son los marcados con las letras D, E, F y G, los cuales equivalen a la descripción presentada en los pasos 1, 2, 3 y 4 en esta sección.

1. Definir los riesgos principales (Paso D).

La definición de los riesgos más importantes se logra examinando las actividades críticas del modelo determinístico del programa del proyecto y luego seleccionando aquellos riesgos de la lista de riesgos identificados que influyen en mayor medida estas actividades de la ruta crítica (Öztaş y Ökmen, 2005).

2. Asignar distribuciones de probabilidad a los riesgos, definir duraciones mínimas y máximas de las actividades (Paso E).

Se le asignan distribuciones de probabilidad a cada uno de los riesgos. Esto se puede hacer basado en la experiencia o un análisis estadístico de la historia. La SMC se hace efectiva al generar valores entre 0 y 1, los cuales representan la ocurrencia del factor de riesgo. Se usan distribuciones Beta, triangular y log-normal. No se consideran valores negativos porque la metodología asume una posición pesimista (siempre se aumenta la duración de las actividades).

También se definen las duraciones mínimas y máximas, puede ser con el análisis de recursos y consumo por actividad o simplemente por el juicio de expertos.

3. Definir Matriz Riesgo-Actividad (Paso F).

Se define en una matriz la influencia de un riesgo sobre cada una de las actividades como un porcentaje, el cual significa que cada riesgo es culpable de una porción de la variación de la duración de las actividades. La influencia total de todos los riesgos sobre cada actividad debe ser de un 100%.

4. Realizar el Modelo y la Simulación (Paso G).

Se construye un modelo determinístico de la programación de las actividades del proyecto en MS Project. Este se utiliza como base para construir el modelo estocástico en el software Crystal ball y con la ayuda en una hoja de cálculo en MS Excel, teniendo en cuenta los datos de entrada. Se vincula la ecuación 1 en las duraciones de las actividades y se procede a simular.

### **6.3. Construction Project Network Evaluation with Correlated Schedule Risk Analysis Model (CSRAM)**

Onder Okmen y Ahmet Oztas presentan el trabajo "Construction Project Network Evaluation with Correlated Schedule Risk Analysis Model (CSRAM)" en el año 2008, en el cual proponen el modelo de análisis de riesgo de programa correlacionados que utiliza la Simulación Monte Carlo (CSRAM). Este modelo pretende evaluar los programas en condiciones de incertidumbre, cuando se correlacionan duraciones de las actividades y factores de riesgo indirectamente.

Los autores realizan este modelo ya que algunos modelos de análisis de riesgo son incapaces de captar directamente el efecto de los riesgos en las actividades, además de que ignoran la correlación entre actividades. Modelos más avanzados que brindan información sobre la sensibilidad de los factores de riesgo en las actividades, capturan la correlación directamente entre factores de riesgo y actividades, pero ningún modelo tiene verdaderamente en cuenta la correlación entre factores de riesgo.

El modelo CSRAM propone que las correlaciones entre las actividades, se den de manera indirecta así como también las correlaciones entre los factores de riesgo ya que aclaran que "si más de una actividad es candidata a ser influenciada por el mismo factor de riesgo las duraciones de esas actividades están correlacionadas" Okmen y Oztas (2008).

Por otra parte, permite la utilización de datos subjetivos y cualitativos, permitiendo que la obtención de los datos sea muy sencilla, también se tiene en consideración los efectos adversos y favorables de los factores de riesgo, fuera de eso permite hacer un análisis de sensibilidad de la ruta crítica, las actividades y los factores de riesgo.

El CSRAM está diseñado para que los datos que se requieran sean fáciles de obtener, pues pueden ser generados subjetivamente, dependiendo de la experiencia o de condiciones específicas, por lo tanto los datos que se requieren son:

- El diagrama de red (Actividades, relaciones de precedencia) la simple aplicación del CPM.
- Duraciones mínimas y más probables que necesitan para realizar el PERT.
- Los factores de riesgos que más afecten al programa (viene de los procesos de la gestión del riesgo como identificación).
- Grados de influencia de los factores de riesgo por actividad los cuales son representados cualitativamente como muy efectivo, efectivo o inefectivo. Es aquí donde se crea la conexión entre el efecto del riesgo y la actividad. Es necesario crear una matriz donde se especifique de qué manera afecta cada riesgo a cada actividad.
  - Límites de probabilidad del estado del factor de riesgo el cual . Estos límites se determinan entre 0 y 1, mediante la experiencia, indicando sí el riesgo es peor de lo esperado (Adverso), es como se esperaba, o es mejor de lo esperado (Favorable).
- Correlación entre factores de riesgo si es necesario.
- Propiedades la simulación (Se definen la cantidad de iteraciones para la SMC).

La propuesta de los autores se ve reflejada especialmente en la manera de representar el impacto de los riesgos en las actividades. Esta se hace mediante la aplicación de unas ecuaciones (Ver ecuaciones 3 y 4) las cuales dependen de un coeficiente de duración de

actividad, el cual se observa en la ecuación 5, y la vez depende del valor del grado de influencia del riesgo por actividad (Ver ecuaciones 6 y 7 ).

Ecuación 3. Ecuación para el cálculo de la duración Caso 1

$$\begin{aligned} & \textit{Si el coeficiente de duración de actividad} > 0 \\ & \textit{Duración de Actividad} \\ & = [\textit{Duración más probable} + (\textit{Duración máxima} - \textit{Duración más probable}) \times \textit{Coeficiente de duración de la actividad}] \end{aligned}$$

Ecuación 4. Ecuación para el cálculo de la duración Caso 2

$$\begin{aligned} & \textit{Si el coeficiente de duración de actividad} < 0 \\ & \textit{Duración de Actividad} \\ & = [\textit{Duración más probable} + (\textit{Duración más probable} - \textit{Duración mínima}) \times \textit{Coeficiente de duración de la actividad}] \end{aligned}$$

Como se puede observar la ecuación tres representa el concepto de añadir el efecto adverso al riesgo, ya que se parte de que a la duración más probable de la actividad se le sumará una proporción de la diferencia entre el tiempo máximo y más probable. Dicha proporción la genera el coeficiente de duración de la actividad, la cual será mayor o en menor medida, según la situación de ocurrencia de los riesgos y las influencias que tengan sobre la actividad. Esto indica que la duración oscilara entre la duración más probable y la duración máxima.

Por otro lado, la ecuación cuatro representa que si ocurre el riesgo de manera favorable, a la duración más probable de la actividad se le disminuirá una proporción de la diferencia entre la duración más probable y la duración mínima, en otras palabras esto quiere decir que si un existe un efecto positivo en la ocurrencia de un factor de riesgo, la duración de la actividad oscilara entre el mínimo y el más probable.

El coeficiente de duración de la actividad es el que matemáticamente genera la variación de la duración de las actividades. Este coeficiente depende del estado del riesgo el cual es representado por el número aleatorio que simula un caso dentro del límite de probabilidad impuesto a cada riesgo. Por otro lado, el coeficiente también depende del valor asociado al grado de influencia del factor de riesgo-actividad. Este concepto trata de combinar el cómo ocurren los riesgos y estos cómo influyen en las actividades.

Ecuación 5. Coeficiente de duración para la actividad A

$$\begin{aligned} & \text{Coeficiente de duración para la actividad A} \\ &= \sum_{i=1}^N [(\text{Número aleatorio})_i \\ & \times (\text{Valor del grado de influencia del Riesgo por Actividad})_i \end{aligned}$$

Dónde:

i: El número asociado al factor del riesgo.

N: El total de riesgos.

El coeficiente de duración es el agente que aumenta o disminuye la duración de las actividades, por eso, este debe llevar un signo, el cual es determinado por las siguientes condiciones:

- Si la situación del factor del riesgo i es mejor de la esperada o favorable el valor del grado de influencia del riesgo por actividad será negativo.
- Si la situación del factor del riesgo i es peor de la esperada o desfavorable el valor del grado de influencia del riesgo por actividad será positivo.
- Si la situación del factor del riesgo i es como se esperaba el valor del grado de influencia del riesgo por actividad será igual a cero.

Teniendo en cuenta las calificaciones del grado de influencia del riesgo por actividad (muy efectivas, efectivas e inefectivas), estas se traducen a un valor numérico el cual representan el grado de que tanto un factor de riesgo crea incertidumbre sobre una actividad en particular (Okmen y Oztas, 2008).

Los autores proponen traducir esas calificaciones a un valor que se calcula con las Ecuaciones 6 y 7. Como escala de valoración, plantean que se tome como el 70% el total de las calificaciones muy efectivas y el 30% como el total de las calificaciones efectivas para una actividad en particular.

- Si el grado de influencia del riesgo por actividad es muy efectivo

Ecuación 6. Valor del grado de influencia del riesgo por actividad (Muy efectivo)

$$(Valor\ del\ grado\ de\ influencia\ del\ Riesgo\ por\ Actividad)_i = \frac{0.7}{(Número\ calificaciones\ asignadas\ como\ muy\ efectivas\ a\ la\ actividad)}$$

- Si el grado de influencia del riesgo por actividad es efectivo

Ecuación 7. Valor del grado de influencia del riesgo por actividad (Efectivo)

$$(Valor\ del\ grado\ de\ influencia\ del\ Riesgo\ por\ Actividad)_i = \frac{0.3}{(Número\ calificaciones\ asignadas\ como\ muy\ efectivas\ a\ la\ actividad)}$$

Estas ecuaciones explican que si por ejemplo se tuvieran cinco riesgos identificados, y para una actividad dos de dichos riesgos son muy efectivos, otros dos son efectivos y tan solo uno es inefectivo, el valor de influencia del riesgo por actividad para las calificaciones muy efectiva seria  $(0.7/2) = 0.35$ , para las calificaciones efectivas seria  $(0.3/2) = 0.15$  y para las calificaciones inefectivas seria 0.

En términos porcentuales esto representa la repartición de la incertidumbre o impacto que tienen los riesgos sobre las actividades. Los valores de las calificaciones muy efectivas no pueden sumar más de 70% y los valores de las calificaciones efectivas no pueden sumar más de 30% (de ahí la escala de valoración impuesta), esto implica que la sumatoria del valor de influencia de los riesgos por actividad debe ser igual 100%.

En otras palabras lo anterior significa que los factores de riesgo identificados son los responsables de la desviación total de cualquier duración de una actividad, con respecto a su duración esperada (Okmen y Oztas, 2008).

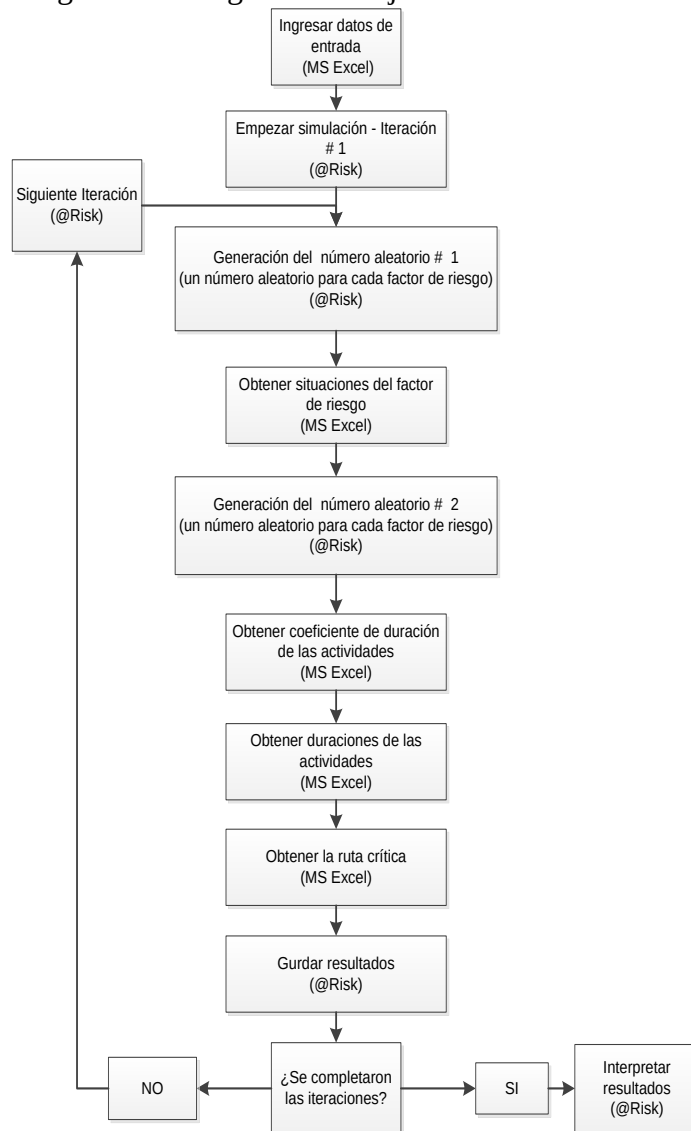
Conociendo los elementos del modelo, la estructura metodológica planteada se resume en los siguientes pasos:

1. Definir el diagrama de red (Actividades, relaciones de precedencia), las duraciones mínimas, esperadas y máximas.

2. Identificar riesgos y sus correlaciones.
3. Definir grados de influencia de los factores de riesgo por actividad.
4. Definir límites de probabilidad del estado del factor de riesgo.
5. Modelar y ejecutar la simulación.

Por otro lado el orden lógico que presenta el modelo y la simulación, se observa en la Figura 6.2.

Figura 6.2. Diagrama de flujo del modelo CSRAM



Fuente: Okemn y Oztas (2008).

#### Descripción de los pasos:

1. Ingresar datos de entrada en MS Excel
2. Empezar iteración #1 con el @Risk  
Se comienza la simulación con la primera iteración, lo que significa correr el modelo para seguir los siguientes pasos.
3. Generar el primer número aleatorio para cada factor de riesgo con el @Risk  
Se genera un número aleatorio, el cual sirve para relacionarlo con los límites de probabilidad del estado del factor de riesgo.
4. Obtener situaciones del factor de riesgo en Ms Excel  
Según los números aleatorios generados por cada riesgo, estos se asignan a cada estado o situación, ya sea peor de lo que se esperaba, esperado, o mejor de lo que se esperaba. Obteniendo así las situaciones o estados particulares de cada riesgo.
5. Generar el segundo número aleatorio para cada factor de riesgo con el @Risk  
Luego de determinar los estados o situaciones de cada riesgo, se debe generar el segundo número aleatorio para cada factor de riesgo el cual sirve para computar las duraciones de las actividades.
6. Obtener los coeficientes de duraciones de las actividades en MS Excel  
En este paso se debe calcular el coeficiente de duración para cada actividad, el cual puede ser negativo o positivo según las condiciones impuestas y es calculado como la sumatoria de la multiplicación del número aleatorio por el grado de influencia del riesgo en términos numéricos.
7. Obtener las duraciones de las actividades en MS Excel  
Dependiendo del coeficiente de duración si es positivo o negativo, se calcula la duración de cada actividad.
8. Obtener la ruta crítica en MS Excel  
Se deben identificar las actividades que hacen parte la ruta crítica y calcular la duración total para cada iteración.
9. Guardar Resultados en @Risk
10. Repetición  
Si hace falta completar iteraciones se debe repetir el procedimiento hasta que se completen. Cuando ya todas las iteraciones que se hayan definido para la simulación se puede pasar al último paso.



#### 11. Interpretar resultados

Cuando se termina la simulación, todos estos valores se configuran en términos estadísticos y gráficos, tales como distribuciones de probabilidad acumulativa, desviaciones estándar, medias, etc. Estos datos resultantes muestran muchos aspectos del proyecto, como el rango de probabilidad de completar la duración de todo el proyecto, el grado de criticidad de las actividades, las sensibilidades de la ruta crítica a factores de riesgo, y la sensibilidad del proyecto a los factores de riesgo. Por lo que el administrador del proyecto puede usar estos datos en la toma de decisiones para el control del programa, desarrollo de estrategias de respuesta al riesgo, la asignación de recursos, etc. (Okmen y Oztas, 2008).

### 6.4. Schedule Risk and Contingency Using @Risk and Probabilistic Analysis

Trabajo publicado en Agosto de 2010 en el que el autor dio a conocer su propuesta de cuantificar el riesgo de programa en un proyecto usando el software @Risk versión 2010.

Justificó la utilización de esta herramienta en los problemas emergentes que pueden afectar el programa del proyecto (riesgos) y la necesidad de los directores de proyectos de formular la programación de los proyectos de tal forma que se tome en cuenta el efecto de estos y traducirlos en fechas asociadas a un grado de confiabilidad razonable.

Resaltó como principal beneficio de incorporar a la gestión de proyectos el análisis cuantitativo de riesgos, la posibilidad de calcular la probabilidad o nivel de confianza de un objetivo del proyecto (como el tiempo de finalización del proyecto) ya que se convierte en una medición muy potente y persuasiva a la hora de tomar decisiones.

El autor propone un modelo de análisis cuantitativo de riesgos de programa que consta de dos particularidades, en primer lugar, se parte de la construcción del modelo CPM clásico en Microsoft Project, en el que las duraciones de las actividades son determinísticas y están sujetas a las restricciones de precedencia que sean del caso.

En segundo lugar, se añaden los riesgos (identificados con anterioridad) como variables internas del modelo (opción proporcionada por el software) a las que les asigna su respectiva probabilidad de ocurrencia mediante distribuciones binomiales, característica que en cada ensayo de la simulación Monte Carlo determina si ocurre o no cada riesgo.

Fuera de estas variables internas, añade al proyecto, en una sección independiente al modelo original, un número de actividades auxiliares (no son actividades reales del proyecto) equivalente al número de riesgos que se quiera modelar. La función de estas actividades ficticias es representar el impacto de cada uno de los riesgos. Lo anterior lo logra mediante la asignación de distribuciones de probabilidad (Triangular, Beta, uniforme, etc.) para la duración de cada una de estas actividades ficticias. Hay que resaltar que para realizar esta asignación se deben tener determinados los parámetros de entrada requeridos;

por ejemplo, el impacto más probable, el máximo, y el mínimo, que en términos del software serían la duración más probable, la máxima y la mínima.

Ya realizado lo anterior, asigna a cada actividad ficticia (riesgo) un vínculo con las actividades reales del proyecto que se verían afectadas en su duración si el riesgo ocurriese. Lo anterior lo logra añadiendo restricciones de precedencia de tipo final-comienzo entre las actividades ficticias y las actividades reales. Este enfoque logra añadir la variabilidad que se quiere simular ya que una actividad afectada por la ocurrencia de un riesgo no puede comenzar sino hasta después que haya finalizado la duración de la actividad ficticia que representa dicho riesgo.

Finalmente, se agregan al modelo un conjunto de restricciones de tipo condicional entre las variables internas y sus respectivas actividades ficticias; por ejemplo, dado un riesgo  $i$  se añade una restricción del tipo “si el riesgo  $i$  ocurre, entonces la duración de la actividad ficticia  $X_i$  se determina por la distribución de probabilidad asignada, de lo contrario la duración  $X_i$  de la actividad es cero”. Con estas restricciones, la mecánica del modelo queda completada, ya que logra vincular el modelo determinístico, las variables internas, las actividades ficticias y las restricciones de precedencia entre las actividades ficticias y las reales, con lo que se puede correr la simulación.

El autor ilustró su propuesta metodológica con un caso estudio de datos ficticios con el que probó la estructura planteada partiendo de una lista de riesgos ficticios típicos para un proyecto, cada uno de estos eventos se comparó en dos componentes, la probabilidad de ocurrencia y el impacto mínimo-máximo (más probable) si cada riesgo ocurriera. Se calculó entonces el riesgo de programa y de las acciones de respuesta usando tres pasos: 1) Entrando probabilidad y distribuciones de impacto de cada riesgo en el software. 2) Definiendo los resultados requeridos y corriendo la simulación Monte Carlo y 3) Interpretando los resultados del caso expuesto.

## **6.5. Propiedades de las estructuras metodológicas**

A continuación se presenta un resumen de las propiedades de las estructuras metodológicas. Se aclara que al mencionar Estructura 1 se hace referencia a la estructura presentada en la sección 6.1, la Estructura 2 hace referencia a la estructura presentada en la sección 6.2, la Estructura 3 hace referencia a la estructura presentada en la sección 6.3 y la Estructura 4 hace referencia a la estructura presentada en la sección 6.4.

### **6.5.1. Características Principales**

*Estructura 1:* Pretende demostrar la importancia del proceso de análisis de riesgos de programa mediante la estimación de la duración total del proyecto. Es un modelo que incluye el impacto de los riesgos implícitamente dentro la definición de las duraciones de las actividades.

*Estructura 2:* Propone evaluar el impacto de los riesgos de programa en condiciones de incertidumbre en proyectos de construcción basándose en el juicio de expertos. Es un modelo pesimista el cual disminuye el efecto de la estimación de datos imprecisos durante la planeación del proyecto, incrementando la duración total de proyecto.

*Estructura 3:* Propone evaluar la red de actividades en proyectos de construcción bajo incertidumbre, cuando las duraciones de las actividades y los factores de riesgo están ambos correlacionados entre sí. Es un modelo que tiene en cuenta los efectos favorables y adversos de los riesgos, la correlación entre las mismas actividades y las correlaciones entre los factores de riesgo.

*Estructura 4:* Propone formular la programación de los proyectos de tal forma que se tome en cuenta el efecto de los riesgos y traducirlos en fechas asociadas a un grado de confiabilidad. El modelo vincula las duraciones determinísticas de las actividades con los efectos de los riesgos mediante actividades ficticias con la ayuda de MS Project.

### **6.5.2. Ventajas**

*Estructura 1:* Es un modelo práctico al incluir el efecto de los riesgos indirectamente en las duraciones mínimas y máximas, simplificando el proceso de análisis de riesgos de programa y obteniendo resultados sobre la duración probabilística total del proyecto.

*Estructura 2:* Permite tomar datos subjetivos y conocer la duración total del proyecto teniendo en cuenta la probabilidad, además de revelar las actividades críticas que más afectan al proyecto.

*Estructura 3:* Es un modelo que simplifica los datos de entrada, el cual permite realizar un análisis de sensibilidad de los riesgos sobre las actividades, las rutas críticas y el proyecto.

*Estructura 4:* La principal ventaja es la modelación específica del comportamiento de un riesgo y del efecto de este sobre el objetivo del proyecto que se quiere evaluar.

### **6.5.3. Limitaciones**

*Estructura 1:* Es tan solo un acercamiento a la modelación de la incertidumbre, el cual contempla la relación de los riesgos con las actividades muy superficialmente, perdiendo la capacidad de identificar la sensibilidad que existen en dichas relaciones.

*Estructura 2:* Los factores de riesgo-actividad de manera porcentual, los cuales son una entrada del modelo, pueden llegar a ser muy difíciles de definir por parte del experto perdiendo su validez. La ecuación propuesta genera un sesgo de la realidad por la condición pesimista impuesta, pues a menor sea el efecto del riesgo generado por la SMC la duración de la actividad tenderá a su duración máxima, lo que debería ser en realidad totalmente al contrario.

*Estructura 3:* El cálculo de los valores de influencia del riesgo no consideran la posibilidad de que hay solo un tipo de clasificación, necesariamente debe haber de las dos tipos de calificación para que la repartición de la incertidumbre por parte de los riesgos se de en un 100%. Se ignora el detalle del efecto de los riesgos en las actividades, por ejemplo si una

actividad es afectada en distintos periodos de tiempo o en lugares específico (Okmen y Oztas, 2008).

*Estructura 4:* Presenta una falencia en la obtención de los datos de las relaciones riesgo-actividad, ya que a para un proyecto con muchas actividades y un gran número de riesgos habría que estimar la distribución de probabilidad del impacto de los riesgos para cada actividad.

#### **6.5.4. Identificación de Riesgos**

*Estructura 1:* Se realiza mediante consulta de expertos, revisión de cláusulas de contratos y documentos del proyecto en particular.

*Estructura 2:* Se realiza mediante consulta de expertos preguntando por los que influyen en mayor medida las actividades de la ruta crítica.

*Estructura 3:* Se realiza por cualquier metodología propuesta en la gestión general de los riesgos.

*Estructura 4:* Se realiza por el trabajo del equipo del proyecto o cualquier medio que provea la lista de riesgos típicos que afecten al proyecto en cuestión.

#### **6.5.5. Propiedades del Riesgo**

*Estructura 1:* Únicamente se describen los riesgos.

*Estructura 2:* Se asignan distribuciones de probabilidad que simula la ocurrencia del riesgo.

*Estructura 3:* Se asignan límites de probabilidad, los cuales definen un estado del riesgo, como favorable, esperado o adverso.

*Estructura 4:* Son actividades ficticias las cuales se les define tanto la probabilidad de ocurrencia binomial como el impacto en términos de distribución de probabilidad en días para cada actividad.

#### **6.5.6. Propiedades de las duraciones de actividades**

*Estructura 1, 2, 3:* Se requieren las duraciones: Determinísticas y Mínimas, probables y máximas.

*Estructura 4:* Se utilizan las duraciones determinísticas.

#### **6.5.7. Relación Riesgo - Actividad**

*Estructura 1:* Existe una relación implícita, donde los riesgos son los agentes que ayudan a definir la variación de la duración de las actividades.

*Estructura 2:* Se definen los factores de Riesgo-Actividad, los cuales representan el porcentaje del efecto de un riesgo para una actividad en particular.

*Estructura 3:* Se definen Grados de influencia de los factores de riesgo por actividad los cuales son representados cualitativamente como muy efectivo, efectivo o inefectivo. Luego

se traducen a un valor numérico, el cual representa el grado relativo de que tanta incertidumbre le genera un riesgo a la duración de una actividad.

*Estructura 4:* Se añaden restricciones de precedencia de tipo final-comienzo entre las actividades ficticias (riesgos) y las actividades.

#### **6.5.8. Correlación Riesgos**

*Estructura 1:* No presenta.

*Estructura 2:* Si existen correlaciones entre riesgos, estas se representan mediante la inclusión de una matriz de correlación en software respectivo de simulación.

*Estructura 3:* Si existen correlaciones entre riesgos, se debe equiparar los límites de probabilidad de los riesgos correlacionados y vincular los mismos números aleatorios para cada riesgo correlacionado, de esta manera el comportamiento de los riesgos se equipara.

*Estructura 4:* No presenta.

#### **6.5.9. Software**

*Estructura 1:* Simulación en Excel con ayuda de Crystal ball, programa en MS Project

*Estructura 2:* Simulación en Excel con ayuda de Crystal ball, programa en MS Project

*Estructura 3:* Simulación en Excel con ayuda de @Risk, programa en MS Project

*Estructura 4:* Simulación en MS Project con ayuda de @Risk

#### **6.5.10. Requerimientos de Entrada**

*Estructura 1:* Duraciones Mínimas y Máximas teniendo en cuenta los riesgos principales.

*Estructura 2:* Información del programa de actividades (Duraciones mínimas, más probables y máximas, precedencias, posposiciones, etc.), Riesgos principales, Matriz Riesgo-Actividad, Distribuciones de probabilidad de los riesgos, Matriz Correlación entre riesgos.

*Estructura 3:* Información del programa de actividades (Duraciones mínimas, más probables y máximas, precedencias, posposiciones, etc.), Riesgos principales, grados de influencia Riesgo-Actividad, límites de probabilidad de los estados de riesgos, definición de la correlación entre riesgos.

*Estructura 4:* Duraciones determinísticas, probabilidad binomial de los riesgos, distribución de probabilidad de los riesgos en términos de duración en días.

### **6.6. Análisis comparativo de estructuras metodológicas**

Los trabajos propuestos por Okmen y Oztas plantean un supuesto en común, el cual hace referencia a que la variación de la duración de las actividades en un proyecto de construcción es debida únicamente al efecto de los riesgos. Esta idea permea cada modelo presentado de dichos autores.

En el primer trabajo propuesto por Okmen y Oztas, estos pretenden revelar la importancia del análisis de los riesgos de programa en proyectos de construcción. A pesar de la practicidad del modelo al incluir implícitamente los efectos de los riesgos en la estimación de las duraciones de las actividades, se recalca el hecho de que la existencia de los riesgos son los agentes vitales en la definición de las duraciones. Este trabajo es el punto inicial del cual parte la sofisticación de los modelos siguientes.

En el JRAP, se plantea una metodología la cual aboga por el uso de datos subjetivos, donde se propone que las relaciones de los riesgos y las actividades sean de manera directa en términos de un porcentaje, el cual indica en qué proporción es el impacto de un riesgo específico sobre la variación de la duración de una determinada actividad. El supuesto en común se ve reflejado de manera distinta, y esta vez es por el empleo de la ecuación propuesta, sin embargo, dicha ecuación propicia una sobre estimación de la duración de las actividades, debido a la condición pesimista inherente del modelo.

El CSRAM, provee unas mejoras considerables con respecto al JRAP, entre ellas una mayor simplicidad de los datos de entrada, una mejora en la adaptación de las relaciones de las variables, una visión distinta sobre la estimación de la duración de las actividades y un mejor y más completo análisis de sensibilidad de los riesgos. La simplificación de los datos de entrada hace referencia a que la relación riesgo – actividad ya no se pregunta cómo porcentaje del efecto de un riesgo sobre una actividad, sino en términos cualitativos, los cuales posteriormente se traducen a un valor numérico, permitiendo una mejor interpretación del significado de dicha relación. Por otro lado la correlación entre los riesgos ya no es necesaria definirla, sino que simplemente conociendo dicha correlación se adapta el modelo. La estimación de la duración de las actividades rompe el paradigma pesimista del JRAP, y por lo contrario, ofrece calcular el efecto favorable de los riesgos sobre las actividades. Además, a diferencia del JRAP, el CSRAM provee un análisis detallado no solo de las actividades críticas, si no de los riesgos y su relación con las actividades, cadenas críticas, y el proyecto en general.

La propuesta de Wallace tiene un enfoque más práctico con la ayuda del software MS Project, sin la necesidad de incluir ecuaciones para el cálculo de las duraciones de las actividades. Debido a esta visión existen principalmente dos características diferentes en comparación a las estructuras de Okmen y Oztas, la primera hace referencia a la modelación del impacto de los riesgos y la segunda a la asignación de una probabilidad de ocurrencia del riesgo.

En las anteriores estructuras se deben definir las duraciones mínimas, esperadas y máximas, esto debido al supuesto de que la variación de las duraciones de las actividades es provocada únicamente por los riesgos. Este hecho hace que el efecto de los riesgos se delimite por los rangos de duración impuestos de cada actividad, lo que implica que los riesgos solamente influirán de manera negativa tomando como máximo la duración máxima impuesta a la actividad.

Sin embargo, la propuesta de Wallace postula que los agentes de cambio de las actividades no necesariamente tienen que estar supeditados a la definición de las duraciones máximas o mínimas, si no que los riesgos afectan a la duración determinística de una actividad de una manera particular, en términos del impacto directo en días que ejerce cada riesgo respecto a cada actividad y no exactamente dentro del límite de la duración de la actividad.

Otra de las diferencias, es que Wallace introduce el concepto de probabilidad binomial de ocurrencia del riesgo, en cambio en el JRAP se propone una distribución de probabilidad y en el CSRAM se definen unos límites de probabilidad los cuales definen los estados de los riesgos. El concepto de Wallace resalta que un riesgo puede ocurrir o no ocurrir, en cambio en las propuestas de Okmen y Oztas la ocurrencia del riesgo se da como un hecho, y la definición de sus probabilidades, está encaminada a definir en qué estado ocurre el riesgo, dejando implícito una relación del posible impacto que puede tener.

Las diferentes propuestas buscan modelar la realidad de los proyectos en un ambiente de incertidumbre, unas tratan de simplificar la obtención de los datos, otras de considerar más relaciones entre las variables, otras proporcionan un mayor análisis entre ellas, sin embargo, son todas susceptibles a la calidad de los datos cualitativos de entrada. A pesar de que en algunas propuestas se sugiere definir variables con registros históricos, en ningún momento se lleva a cabo. Esta situación es por un lado positiva debido a la practicidad que se gana en el modelo pero por otro lado negativa ya que se puede perder validez en los datos de entrada debido a la subjetividad.

Otro aspecto que ningún método plantea es que las duraciones de actividades pueden tener una variación natural debido a los recursos y eficiencias inherentes. Esto contrasta la idea presentada en las propuestas de Okmen y Oztas, ya que plantean que los únicos agentes de cambio en la duración esperada de una actividad son los riesgos.

Cada estructura plantea un punto de vista particular y la aplicación de cada una de ellas dependerá de la profundidad del objetivo de análisis, del nivel en que se requiera modelar la realidad, de la complejidad de cada proyecto y las dificultades que se presenten en la obtención de los datos de entrada.

## **7. APLICACIÓN DE LA ESTRUCTURA METODOLÓGICA AL CASO DE ESTUDIO Y ANÁLISIS DE RESULTADOS**

Con base en la caracterización de las estructuras metodológicas descritas anteriormente, en este trabajo se propone la aplicación un modelo. Se plantea un caso de estudio, para aplicar el modelo propuesto, se obtienen los resultados y se validan mediante la evaluación del tiempo total de terminación del proyecto, generando así la priorización de riesgos de programa en obras civiles en la Universidad del Valle.

### **7.1. Estructura metodológica ajustada al caso de estudio**

Con base en la caracterización de las estructuras metodológicas descritas anteriormente, en este trabajo se propone la aplicación de un modelo, el cual es un enfoque metodológico, enmarcado en un sistema de gestión de riesgos, de análisis cuantitativo de riesgos de programa basada en SMC para evaluar las redes de actividades bajo incertidumbre con el objetivo de determinar el tiempo total de terminación del proyecto tomando en consideración el impacto directo de factores de riesgo. Combinando tres elementos, el primer elemento es que el impacto de los riesgos se traduce en términos de duración directamente, el segundo es la inclusión del supuesto de que los riesgos son los únicos agentes de cambio de la duración de las actividades y como último elemento, la practicidad en la obtención de los datos.

El modelo postulado incluye de la propuesta de Okmen y Oztas del CSRAM, la relación entre los riesgos y las actividades mediante una calificación cualitativa (Grados de influencia) y su posterior traducción numérica mediante las Ecuaciones 6 y 7. Esta característica facilita la modelación de las relaciones riesgo – actividad por su carácter cualitativo.

Fuera de esto, se toma del trabajo propuesto por Wallace (2010), la inclusión de manera independiente en el modelo, la probabilidad de ocurrencia de los riesgos y de su impacto mediante distribuciones de probabilidad, en términos de duración. Esta característica aterriza el efecto del riesgo sobre las actividades del proyecto.

A diferencia de la propuesta planteada por Wallace (2010), el impacto no se modela para cada relación riesgo-actividad, sino que por el contrario se define como un *impacto potencial* de cada uno de los riesgos. Es decir, se define para cada riesgo un impacto mínimo, más probable y máximo que representa para el experto consultado una medida en términos de días del efecto de este riesgo sobre cualquier actividad de importancia.

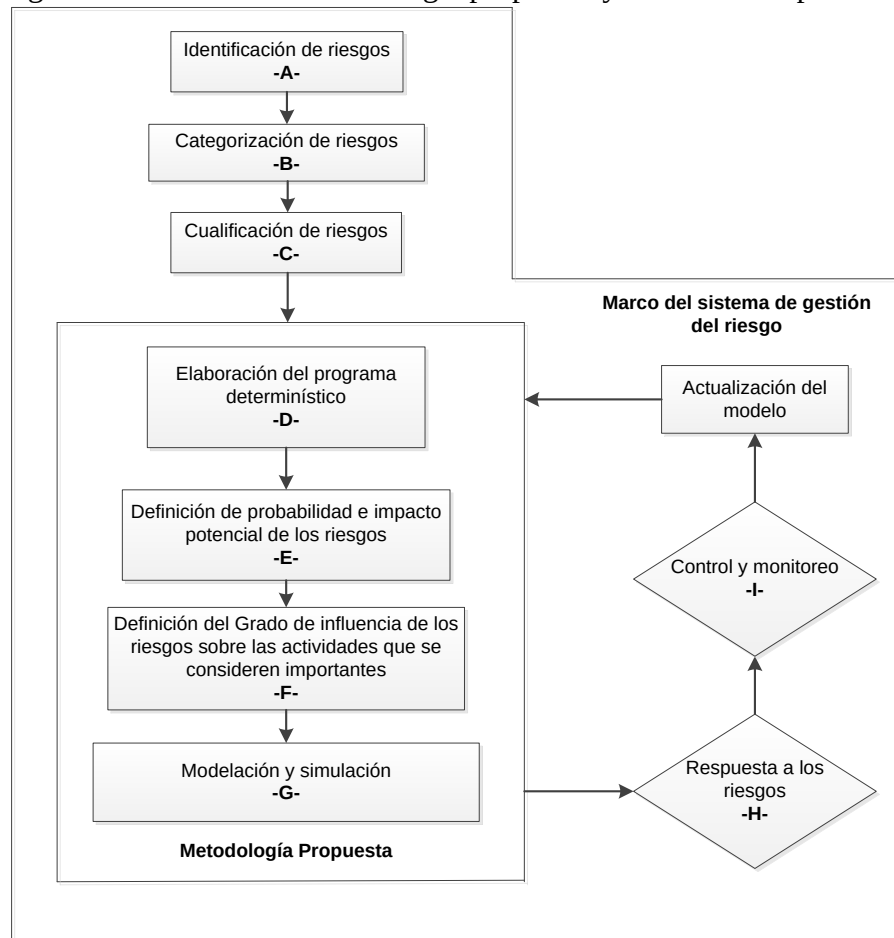
Se propone una fórmula para el cálculo de la duración de las actividades más importantes afectadas por los riesgos. Se toma el supuesto de que la variación de la duración de las actividades se da únicamente por la ocurrencia de los riesgos. Dicha variación se añade a la



duración determinística de la actividad como el impacto potencial del riesgo multiplicado por el valor de la influencia del riesgo sobre la actividad.

La estructura metodológica propuesta y su alcance de aplicación, se muestran en la Figura 7.1., se describen detalladamente los pasos a continuación:

Figura 7.1. Pasos de la metodología propuesta y contexto de aplicación.



Fuente: Elaboración propia, adaptado de Öztaş y Ökmen (2005).

#### 1. Elaboración del programa determinístico (Paso D).

Se debe construir el programa determinístico del proyecto, definiendo las actividades, precedencias, posposiciones, duraciones determinísticas, etc.

#### 2. Definición de probabilidad e impacto potencial de los riesgos identificados (Paso E).

A los riesgos más importantes que puedan afectar al proyecto, se les asigna una probabilidad de ocurrencia. Dicha probabilidad puede basarse en la experiencia de los

expertos tomando como referencia la cantidad de veces que cada riesgo se presentó en los proyectos en los cuales estuvieron los expertos.

Se debe definir el *impacto potencial del riesgo*, donde se identifique la duración mínima, más probable y máxima que puede generar el riesgo sobre cualquier actividad de importancia. Estos parámetros se utilizan para modelar el impacto del riesgo mediante una distribución de probabilidad como la triangular. Debido a que en la definición de este impacto potencial no se está considerando las particularidades del proyecto como las precedencias en las actividades y la ruta crítica, este elemento es un simple punto de referencia del impacto que puede tener cada riesgo en las actividades del proyecto.

### 3. Definición del Grado de influencia de los riesgos sobre las actividades que se consideren importantes (Paso F)

Se definen los grados de influencia de los riesgos sobre las actividades de mayor importancia, como muy efectivos o efectivos, los cuales son tomados del modelo CSRAM propuesto por Okmen y Oztas (2008). Para simplificar la obtención de los datos, esta relación se debe definir sobre las actividades que se consideren del caso, ya sean actividades de la ruta crítica o simplemente consideradas como actividades de gran importancia dentro del proyecto, esto quiere decir que no es necesario definir dicha relación para todas las actividades del proyecto.

Los grados de influencia, muestran el grado relativo de que tanta incertidumbre genera un riesgo particular sobre una actividad (Okmen y Oztas, 2008). No se pregunta por la relación inefectiva porque directamente se pregunta por las relaciones efectivas y muy efectivas. Se sobreentiende que las demás relaciones o grados de influencia entre los riesgos y actividades son inefectivas y no entran en consideración.

### 4. Modelación y simulación (Paso G)

El cuarto paso es la modelación y la simulación de la red de actividades del proyecto. Es necesario contar con distintas herramientas de computación para ejecutar el modelo. La programación determinística debe montarse en un software de planeación de proyectos como MS Project, también es necesario la utilización de hojas de cálculo como MS Excel y el complemento de @Risk, para montar el modelo y ejecutar la simulación.

En este paso, la SMC se hace presente en las propiedades del riesgo definidas como la probabilidad de ocurrencia e impacto potencial. Con el objetivo de conectar la SMC al cálculo de la duración de las actividades de una manera estocástica, se presenta la Ecuación 8 y por consiguiente la ecuación 9.

Ecuación 8. Ecuación para el cálculo de la duración una actividad.

$$\begin{aligned} & \text{Duración de la Actividad}_j \\ &= \text{Duración Determinística}_j + \text{Impacto real de los riesgos sobre la actividad } j \end{aligned}$$

Ecuación 9. Ecuación extendida para el cálculo de la duración una actividad.

$$\text{Duración de la Actividad}_j = \text{Duración Determinística}_j + \sum_i^N (E_i \times IPR_i \times C_{ij}) \quad \forall j$$

Dónde:

- Subíndice i, hace referencia a un riesgo en particular.
- Subíndice j, hace referencia únicamente a las actividades que el experto considere.
- Subíndice N, hace referencia a la cantidad de riesgos.
- $E_i$ , Es una variable binomial que toma el valor de uno o de cero, la cual representa la ocurrencia del riesgo, si toma cero es que no ocurre si toma uno es que si ocurre. Esta variable toma valor dependiendo las probabilidades binomiales de ocurrencia de los riesgos definidas en el paso dos y del número aleatorio arrojado por la SMC en cada iteración asociado a dicha probabilidad.
- $IPR_i$ , Es una variable que representa el impacto potencial del riesgo i, cuyo valor está en días, y es proveniente del resultado de la distribución de probabilidad definida para los riesgos definidos en el paso dos. En esta variable, interviene la generación de números aleatorios con el fin de conocer dicho resultado.
- $C_{ij}$ , Es un parámetro que representa el valor numérico del grado de influencia del riesgo i sobre la actividad j. Este se basa de las calificaciones del grado de influencia del riesgo por actividad definidas en el paso tres. Dichas calificaciones se traducen al valor numérico respectivo, el cual se calcula con las Ecuaciones 6 y 7 del modelo CSRAM de Okmen y Oztas (2008). El valor calculado del grado de influencia, hace referencia el grado relativo de que tanta incertidumbre le genera un riesgo a la duración de una actividad. La suma de dichos valores para cada actividad debe ser igual a uno, lo que aclara, que las variaciones de las duraciones de las actividades son únicamente explicadas por la existencia de los riesgos.

La Ecuación 8 representa la suma de la duración determinística para una actividad j, y el impacto real de los riesgos sobre la actividad j.

La ecuación 9, presenta el detalle del cálculo del impacto real de los riesgos sobre una actividad, el cual es la cantidad de días añadidos a la duración determinística, que es la sumatoria de la multiplicación del impacto potencial de cada riesgo por el valor del grado de influencia de cada riesgo sobre una actividad en particular (el cual es la traducción numérica de los grados de influencia). Esto quiere decir que el impacto real de los riesgos sobre una actividad específica, es la ponderación de todos los impactos potenciales de los riesgos, teniendo en cuenta la influencia de cada riesgo sobre dicha actividad.

Esta aproximación permite entonces sumar a la duración determinística, el impacto directo de los riesgos, lo que debe vincularse dentro de la programación del proyecto en los softwares utilizados, aplicando la formula presentada en las duraciones de las actividades que entren en consideración.

Este nexo permite que al correr la simulación se generen una gran cantidad de posibilidades sobre los efectos de los riesgos en el proyecto. Ya que el impacto de los riesgos fluctúa según su probabilidad y su distribución de impacto potencial, que junto con los grados de influencia de los riesgos sobre las actividades, hace que las duraciones de estas varíen, y por ende varíe la ruta crítica, y la duración total del proyecto. De esta manera se puede conocer que riesgos principales afectan en mayor medida al proyecto y revelar la duración probabilística total del proyecto.

Para ejecutar la simulación se deben definir las propiedades de esta y empezar la corrida de simulación. Una vez se hayan culminado todas las iteraciones, se procede al análisis de resultados.

## **7.2. Proyecto caso de estudio**

### **7.2.1. Contextualización**

Debido al entorno en el cual se está realizando el trabajo se decidió escoger el proyecto constructivo de la etapa básica del edificio de bienestar universitario de la Universidad del Valle, es importante aclarar que el propietario del proyecto es la Universidad a quien se le atribuyen las responsabilidades de entregar los requerimientos técnicos y arquitectónicos y al contratista los de la ejecución.

Los datos, descripción y características del proyecto se obtuvieron del contrato de obra No 067 - 2011 referente al proyecto "Elaboración de proyecto constructivo completo y ejecución de la construcción de la etapa básica del edificio de bienestar universitario que será utilizado para la presentación de servicios de salud en la Universidad del Valle, sede Meléndez" suministrado por la oficina de contratación de la Universidad.

El proyecto constructivo completo se refiere tanto al edificio como a las zonas exteriores y su respectivo urbanismo, parqueaderos, zonas verdes, andenes, sistemas de acueducto, alcantarillado, iluminación, algunos acabados, acometidas, etc. Es muy importante aclarar que el proyecto caso de estudio presentó dos fases, la fase I hace referencia a la construcción de la etapa básica la cual se concentra únicamente en la construcción del edificio, pues el presupuesto y contratación de las obras exteriores (fase II) son objeto de otro proceso contractual. Esto quiere decir que el caso de estudio solo es la fase I del proyecto constructivo completo.

### **7.2.2. Descripción, objetivo y alcance del proyecto**

Las descripciones de los pliegos de licitación resaltan que el proyecto objeto de estudio fue realizado por la Universidad siguiendo los lineamientos de su política institucional en relación con los servicios de bienestar y atendiendo a las demandas espaciales para el cabal desempeño de las actividades misionales que se desarrollan en las instalaciones de la Universidad.

El alcance del proyecto para el contratista se definió en términos de la elaboración del proyecto arquitectónico, los estudios técnicos completos para el proyecto y la construcción del edificio de prestación de servicio de salud (para empleados y jubilados con sus beneficiarios) de la Universidad del Valle en la ciudad universitaria sede Meléndez. En el proyecto se han previsto los costos directos e indirectos de ejecución del contrato, incluyendo los diseños y la obra.

### **7.2.3. Ejecución del proyecto**

Con el fin de validar la propuesta metodológica para la cuantificación de los riesgos. Se consultaron los hechos reales del proyecto, logrando conocer el contexto contractual, los eventos adversos que ocurrieron y la fecha de terminación del proyecto objeto de estudio, tomando como base el contrato No 067 – 2011 , los adicionales al contrato, las actas de inicio y final de obra, y las solicitudes de ampliación por parte del contratista a la Universidad.

El proyecto de la etapa básica fase I, el cual es el proyecto objeto de estudio, empezó un proceso de licitación el cual culminó el 23 de septiembre del 2011, por otro lado el contrato del proyecto respectivo al No 067 – 2011, se firmó el 28 de octubre del 2011, la ejecución de obra empezó el día 25 de noviembre del 2011, cuya fecha máxima de entrega fue pactada 180 días calendario después del inicio, es decir, hasta el 22 de mayo del 2012, la cual posteriormente se le añadió una prórroga de 60 días calendario dejando como promesa final la fecha del 20 de Julio del 2012. Esto debido a las causas registradas a continuación:

- Retraso en trámite y aprobación de licencia de construcción.
- Retraso en instalación tardía de los servicios públicos, agua y energía.
- Retraso por fuerte invierno.
- Incertidumbre sobre el alcance final de construcción entregable dentro del objeto del contrato.
- Retraso en el pago de la segunda cuota sobre obras ejecutadas.
- Retraso por imprevisto en la cimentación (Incremento de rellenos para desaguar al alcantarillado).

Es importante resaltar, que el proyecto completo fue definido en dos fases, las cuales tenían procesos contractuales distintos. Sin embargo, durante la ejecución de la primera fase (la

cual es la fase objeto de estudio), la Universidad decidió contratar al mismo contratista para la ejecución de la segunda fase, consolidando los dos proyectos en un solo contrato. Debido a esto el acta de recibo final de la obra contiene las fechas de inicio y terminación del proyecto en conjunto, las cuales hacen referencia al Inicio de la fase I y al final de la fase II. Dichas fechas fueron 25 de noviembre 11 del 2011 y 27 de noviembre del 2012 respectivamente.

Lo anterior indica que no se posee la fecha exacta de terminación de la etapa básica (el proyecto objeto de estudio). Sin embargo, gracias a la información que se obtuvo de los plazos concebidos, se hace un supuesto de que la fecha real de terminación es la misma fecha de entrega pactada después de la prórroga, es decir, el 20 de julio del 2012.

Posteriormente el 24 de julio del 2012 se firmó el adicional 2 al contrato No 067 – 2011, ampliando nuevamente el plazo a 90 días calendario donde se añadió los alcances de la fase II, además de esto, hubo otro plazo de 30 días calendario para terminar la fase II, dando como fecha final de entrega total del proyecto completo, la descrita anteriormente.

### **7.3 Aplicación de la Estructura Metodológica Propuesta**

#### **7.3.1. Elaboración del programa determinístico**

Las actividades, relaciones y duraciones del proyecto fueron extraídas del programa en físico presentado por el contratista a la Universidad, que se encuentra bajo la responsabilidad de la Oficina de Planeación y Desarrollo.

A partir de dicho documento, se construyó el programa determinístico en el software Microsoft Project. Lo anterior debido a la indisponibilidad del contratista para suministrar el programa digital original.

#### **7.3.2. Definición de probabilidad e impacto potencial de los riesgos identificados**

Con apoyo del experto E3 (Tabla 5.7) de la Universidad del Valle, se definieron las probabilidades de ocurrencia de los riesgos seleccionados para evaluar en el análisis cuantitativo, las cuales se consignan en la Tabla 7.1.

Tabla 7.1. Probabilidades de ocurrencia de los riesgos.

| ID | Descripción                                                                                | Probabilidad de ocurrencia |
|----|--------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|
| 4  | Retraso en el desarrollo de la obra por inconsistencias o falta de claridad en los diseños | 70%                        |
| 6  | Problemas técnicos imprevistos en construcción                                             | 40%                        |
| 28 | Condiciones del terreno imprevistas                                                        | 15%                        |
| 20 | Suspensión del trabajo por parte del contratante                                           | 50%                        |
| 32 | Retrasos en resolver disputas con partes interesadas                                       | 20%                        |
| 8  | Dificultades financieras de contratistas                                                   | 10%                        |
| 29 | Efectos del clima lluvioso en las actividades de construcción                              | 5%                         |
| 41 | Retrasos - Incumplimiento de subcontratistas                                               | 5%                         |
| 18 | Tomas de decisiones lentas del dueño del proyecto                                          | 70%                        |
| 31 | Retrasos en resolver los problemas contractuales                                           | 30%                        |

Fuente: Elaboración Propia.

En seguida, se definieron para cada riesgo los parámetros de duración mínima, esperada y máxima del impacto potencial de cada uno de los riesgos, datos que se pueden observar en la Tabla 7.2.

Tabla 7.2. Parámetros del impacto potencial de cada riesgo.

| ID | D.MIN (Días) | D.ESP (Días) | D.MAX (Días) |
|----|--------------|--------------|--------------|
| 4  | 15           | 30           | 90           |
| 6  | 15           | 20           | 60           |
| 28 | 5            | 10           | 15           |
| 20 | 15           | 30           | 60           |
| 32 | 30           | 45           | 60           |
| 8  | 5            | 10           | 15           |
| 29 | 10           | 15           | 20           |
| 41 | 10           | 15           | 20           |
| 18 | 15           | 30           | 90           |
| 31 | 15           | 30           | 90           |

Fuente: Elaboración Propia.

### 7.3.3. Definición del Grado de influencia de los riesgos sobre las actividades

Siguiendo la estructura metodológica propuesta, se procedió entonces a definir con el experto los grados de influencia de los riesgos sobre las actividades, proceso realizado en la entrevista con un método particular; a diferencia de las estructuras metodológicas caracterizadas en el Capítulo 6 que plantean el uso de matrices Riesgo-Actividad de manera preconcebida a la hora de levantar los datos cualitativos de estas relaciones, la dinámica para el levantamiento de los datos implementada no obligaba al experto a definir estas relaciones para todos los cruces riesgo-actividad (no se lleva preparada con antelación una

matriz de estas características), sino que se deja a discreción del experto la definición de las mismas.

El proceso consistió en preguntar por las actividades que se veían afectadas por cada riesgo, esta diferencia en el método para la recolección de los datos permitió al experto dirigir el impacto del riesgo a las partes del proyecto de su consideración, por ejemplo, para el caso de riesgos como la “suspensión del trabajo por parte del contratante” el experto reconoció que dependiendo la fase del proyecto en la que el riesgo pudiera ocurrir la relación podía ser efectiva, muy efectiva o inexistente. En esta dinámica, el experto tenía libertad de afectar una actividad de la cadena crítica del proyecto de una de las fases finales del proyecto de manera efectiva si consideraba que esa era el grado de influencia adecuado a determinar. Lo anterior, permitió focalizar el impacto de los riesgos desde una perspectiva global del proyecto, es decir, al afectar una actividad en específico el experto en realidad podía estar afectando una fase o etapa del proyecto y según esto especificar de manera implícita la gravedad de la ocurrencia del riesgo en una fase u otra según el grado de influencia que definiera para dichas relaciones.

Adicionalmente, esta dinámica disminuye el número total de relaciones riesgo-actividad que define el experto en comparación al número de relaciones generadas en las estructuras 2 y 3, debido a que al no llevar un formato no se obliga al experto a pensar en todas las posibles relaciones riesgo-actividad. Esto es conveniente ya que para evaluar riesgos como la “suspensión del trabajo por parte del contratante” es poco práctico realizar el cruce de este riesgo con las 114 actividades del programa del caso de estudio, además, es más coherente plantear que este tipo de riesgos afecte a actividades que sean representativas de las fases que el experto considere adecuadas.

Cabe resaltar que la entrevista realizada con este único experto (lo que implica menos discusión) presentó una duración de aproximadamente tres horas, lo que justifica aún más una simplificación en el método para obtener los datos de entrada al modelo. Como resultado de esta sección se logró consignar los grados de influencia de los riesgos sobre las actividades (Tabla 7.3)<sup>††</sup>.

---

<sup>††</sup> Las actividades se registran con el numeral específico correspondiente al programa determinístico, incluido en los documentos de soporte de la versión digital.



Tabla 7.3. Grados de influencia de los riesgos sobre las actividades.

| Actividad | Riesgo |    |    |    |    |    |    |    |    |    | # Riesgos<br>Muy efectivo | # Riesgos<br>Efectivo |
|-----------|--------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|---------------------------|-----------------------|
|           | 4      | 6  | 28 | 20 | 32 | 8  | 29 | 41 | 18 | 31 |                           |                       |
| 1,8       |        | E  | ME |    |    |    | ME |    |    |    | 2                         | 1                     |
| 2,6       | ME     | E  |    |    |    | E  | E  |    |    |    | 1                         | 3                     |
| 2,7       |        |    |    | ME | ME |    |    |    |    | E  | 2                         | 1                     |
| 6,1       | ME     |    |    |    |    |    |    |    | E  |    | 1                         | 1                     |
| 8,3       | ME     | ME |    | ME | E  | ME | E  |    | ME | ME | 6                         | 2                     |
| 9,2       | ME     | ME |    | E  |    |    |    |    |    |    | 2                         | 1                     |
| 11,3      | ME     | ME |    | E  | E  | E  |    | ME | E  | E  | 3                         | 5                     |
| 12,3      |        |    |    |    |    |    |    | ME | E  |    | 1                         | 1                     |
| 12,7      |        |    |    |    |    |    |    | ME | E  |    | 1                         | 1                     |

Fuente: Elaboración Propia.

#### 7.3.4. Construcción del Modelo

Se aclara que el programa construido con actividades de duraciones fijas y bajo el principio de la ruta crítica es lo que se entiende en este proyecto de grado como modelo determinístico, y por modelo estocástico, al programa que incorpora los elementos de incertidumbre (riesgos) incorporando en su construcción la Simulación Monte Carlo. Puntualmente, en este apartado se describe la construcción del modelo estocástico.

Ya teniendo los datos de entrada se construyó el modelo estocástico en una hoja de cálculo. Con la ayuda del software @Risk, el cual permite importar el programa de Ms Project, sobre la hoja de cálculo, se especificaron las variables de entrada y de salida de la Simulación Monte Carlo.

Se definieron entonces como variables de entrada del modelo las ocurrencias de los riesgos y los impactos potenciales, se asignó una variable de ocurrencia de evento por cada riesgo modelado, asignando como parámetros de entrada para las distribuciones binomiales las probabilidades de éxito de la Tabla 7.1, por su parte, las distribuciones para el impacto potencial de cada riesgo se determinaron como triangulares y fueron construidas a partir de los parámetros de la Tabla 7.2.

El siguiente paso en el modelo consistió en construir las relaciones necesarias para la simulación de tal manera que se lograra materializar la Ecuación 9 en el cálculo de la duración de las actividades afectadas por los riesgos. Esta construcción implicó traducir la matriz con los grados de influencia entre los riesgos y las actividades de la Tabla 7.3, a la matriz que se observa en la Tabla 7.4 que contiene los valores del grado de influencia calculados según las Ecuaciones 6 y 7. A partir de estas estructuras se logró especificar las duraciones para las actividades afectadas por los riesgos.

Tabla 7.4. Valor de Grados de influencia de los riesgos sobre las actividades.

| Actividad | Riesgo |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|-----------|--------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|           | 4      | 6    | 28   | 20   | 32   | 8    | 29   | 41   | 18   | 31   |
| 1,8       |        | 0,30 | 0,35 |      |      |      | 0,35 |      |      |      |
| 2,6       | 0,70   | 0,10 |      |      |      | 0,10 | 0,10 |      |      |      |
| 2,7       |        |      |      | 0,35 | 0,35 |      |      |      |      | 0,30 |
| 6,1       | 0,70   |      |      |      |      |      |      |      | 0,30 |      |
| 8,3       | 0,12   | 0,12 |      | 0,12 | 0,15 | 0,12 | 0,15 |      | 0,12 | 0,12 |
| 9,2       | 0,35   | 0,35 |      | 0,3  |      |      |      |      |      |      |
| 11,3      | 0,23   | 0,23 |      | 0,06 | 0,06 | 0,06 |      | 0,23 | 0,06 | 0,06 |
| 12,3      |        |      |      |      |      |      |      | 0,70 | 0,30 |      |
| 12,7      |        |      |      |      |      |      |      | 0,70 | 0,30 |      |

Fuente: Elaboración Propia.

Seguidamente, se seleccionaron como variables de salida del modelo la duración total y la fecha de finalización del proyecto.

Fuera de esto, se registraron las entradas para la construcción del diagrama de tornado el cual es la herramienta de análisis de sensibilidad utilizada en la simulación Monte Carlo. Este diagrama es de vital importancia para el proyecto ya que es la técnica que determina la importancia de cada uno de los riesgos en función de la variabilidad ocasionada en la duración y fecha de entrega final del proyecto, aspecto que últimamente es el criterio de priorización de los riesgos.

Finalmente se definió como parámetro de entrada para la construcción del diagrama de tornado el consignado en la Ecuación 10. Esta expresión representa la suma de los impactos (en términos de duración) generados por cada riesgo sobre las actividades afectadas por este último.

Ecuación 10. Ecuación para el impacto total del riesgo.

$$\text{Impacto total del riesgo}_i = \sum_j (IPR_i \times C_{ij}) \quad \forall i$$

### 7.3.5. Resultados de la Simulación

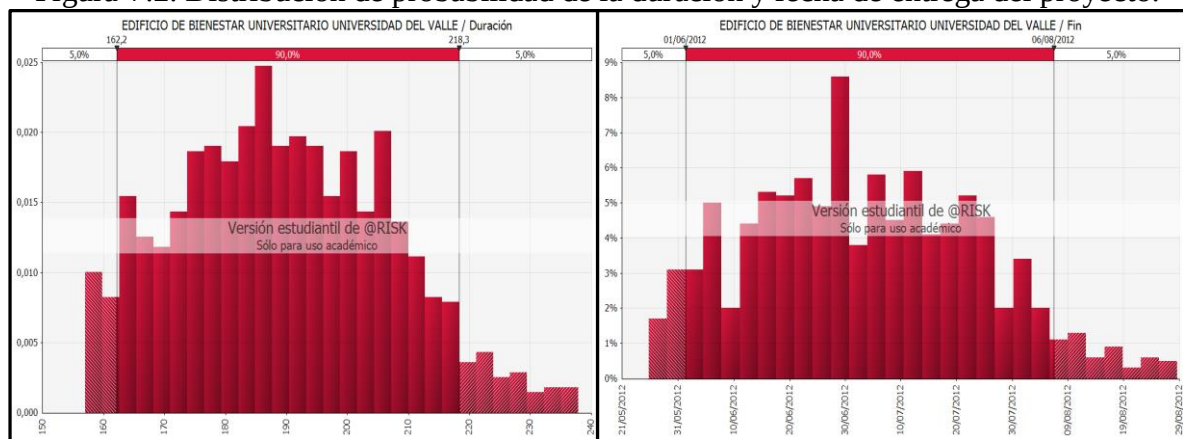
La simulación se efectuó realizando en primera instancia una simulación con una muestra de 1000 ensayos de la que se obtuvieron los resultados de la Tabla 7.5 y las Figuras 7.2 y 7.3, cabe resaltar que los resultados consignados en esta sección hacen alusión a los obtenidos en esta primera simulación; sin embargo, el contenido de la sección de discusión de resultados toma en cuenta la realización de otras simulaciones.

Tabla 7.5. Resultados estadísticos de la simulación.

| Estadísticos    | Duración    | Fecha     |
|-----------------|-------------|-----------|
| <b>Mínimo</b>   | 157 días    | 25/5/2012 |
| <b>Máximo</b>   | 237,85 días | 28/8/2012 |
| <b>Media</b>    | 189,55 días | 3/7/2012  |
| <b>Desv Est</b> | 17,42 días  | 20,33     |
| <b>Varianza</b> | 303,42      | 413,31    |
| <b>Sesgo</b>    | 0,23        | 0,22      |
| <b>Curtosis</b> | 2,45        | 2,45      |
| <b>Mediana</b>  | 188,4 días  | 2/7/2012  |
| <b>Moda</b>     | 157 días    | 25/5/2012 |

Fuente: Elaboración Propia.

Figura 7.2. Distribución de probabilidad de la duración y fecha de entrega del proyecto.



Fuente: Elaboración Propia.

Las medidas estadísticas de tendencia obtenidas en las distribuciones fueron una media para la duración total del proyecto de 189 días y una media para la fecha de finalización del proyecto ubicada el día 3 de julio de 2012 (Ver tabla 7.5), valores por encima tanto de las medianas de 189,55 días y 2 de julio de 2012 como de las modas de 157 días y 25 de mayo de 2012.

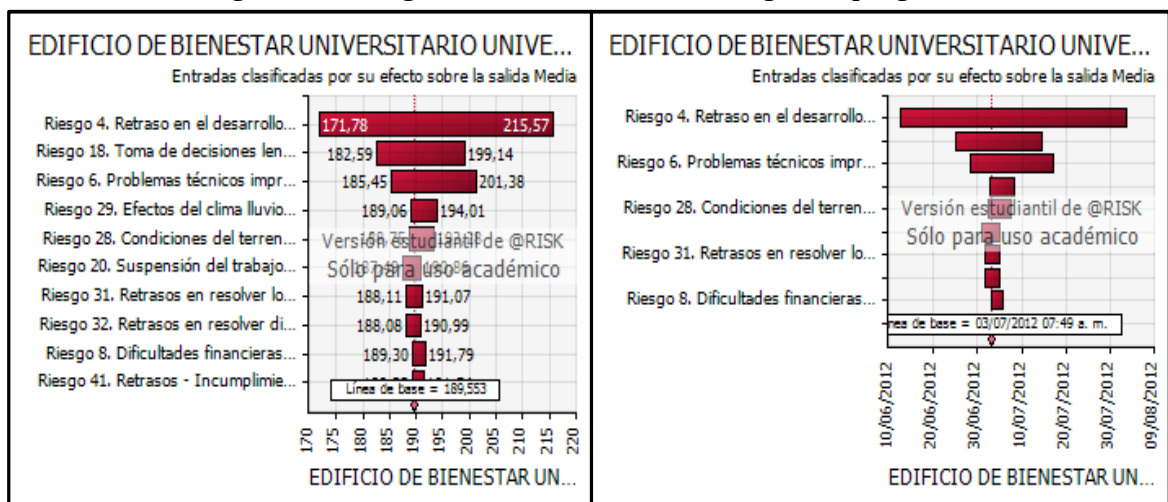
En cuanto a las medidas de dispersión la simulación arrojó para la duración total del proyecto una varianza y desviación estándar de 303,42 y 17,42 días, respectivamente. Además, la duración total del proyecto osciló entre un valor mínimo de 157 días y un máximo de 237 días, obteniendo así un rango de variación para la duración del proyecto de 80 días. Rango que corresponde a la fecha mínima de entrega del proyecto del 25 de mayo de 2012 y la máxima correspondiente al día 28 de agosto de 2012.

Por otra parte, las medidas de forma de la distribución indican que, en primer lugar, la distribución presenta un sesgo positivo de 0,23 lo que señala una asimetría en los datos hacia el lado derecho de la distribución y en segundo lugar, un coeficiente de curtosis de 2,45 revelando que la distribución de sus datos presenta una forma leptocúrtica<sup>§§</sup>.

Adicionalmente, los percentiles de la distribución manifiestan un 5% de confiabilidad para una promesa de finalización del proyecto asignada el día 1 de junio de 2012 y un grado de confiabilidad del 95% a una fecha de entrega del proyecto para el día 6 de agosto del mismo periodo.

Finalmente, el diagrama de tornado (Figura 7.3) ubicó como los riesgos generadores de mayor variabilidad en la duración y fecha de entrega final del proyecto a: los retrasos en el desarrollo de la obra por inconsistencia en los diseños (Riesgo 4), la toma de decisiones lentas por parte del contratante (Riesgo 18) y los problemas técnicos imprevistos en construcción (Riesgo 6).

Figura 7.3. Diagrama de tornado de los riesgos de programa.



Fuente: Elaboración Propia.

### 7.3.6. Discusión de resultados

#### 7.3.6.1. Validación del modelo

Para validar los resultados arrojados por el modelo estocástico utilizado en el análisis cuantitativo de riesgos, se compararon: la fecha de finalización arrojada por el modelo estocástico para un nivel de confiabilidad de 90% (30 de julio de 2012), la arrojada por el modelo determinístico (25 de mayo de 2012), la pactada en el contrato (22 de mayo de 2012) y en la que efectivamente se terminó el proyecto (20 de julio de 2012, 80% de confianza según el modelo).

<sup>§§</sup> Distribución con una curtosis positiva, este es el tipo de distribuciones con colas pesadas, es decir, una alta acumulación de eventos en los extremos de la distribución, característica que es acompañada de picos altos o *apuntalamiento*.

La comparación se realizó en términos de los días laborales asociados a cada una de las fechas de entrega propuesta por los dos modelos y la efectivamente pactada en el contrato (duraciones). Obteniendo el error de cada uno de los modelos (Tabla 7.6.) como la razón entre la diferencia (en días laborales) de las fechas prometidas frente a la fecha real de terminación y la duración real del proyecto correspondiente a 171 días laborales.

Como se puede observar el valor de la fecha de terminación del modelo estocástico para un nivel de confianza de 90% presenta un error de 3% frente a la duración real del proyecto. Por su parte, el modelo determinístico y la fecha contratada presentaron errores de 20% y 21%, respectivamente. A la luz de estos resultados, se puede afirmar que el modelo que más se aproxima a la realidad es el estocástico.

Tabla 7.6. Comparación de resultados frente al comportamiento real del proyecto.

| Fecha real de inicio de la Obra      |                |                   |                        |
|--------------------------------------|----------------|-------------------|------------------------|
| 25/11/2011                           |                |                   |                        |
| Fecha real de terminación de la Obra |                |                   |                        |
| 20/07/2012                           |                |                   |                        |
|                                      | Determinístico | Estocástico (90%) | Pactada en el contrato |
| Fecha                                | 25/05/2012     | 30/07/2012        | 22/05/2012             |
| Duración                             | 157            | 213               | 154                    |
| Error                                | 20%            | 3%                | 21%                    |

Fuente: Elaboración Propia.

Fuera de esto, al comparar los riesgos modelados con los que efectivamente afectaron al proyecto (Apartado 7.2.3), se corrobora que cuatro de los seis eventos que afectaron la duración del proyecto efectivamente se encontraban entre los riesgos modelados, mientras que dos de ellos<sup>\*\*\*</sup>, aunque no se encontraban entre los modelados si se pueden clasificar entre los riesgos identificados (Anexo 2).

---

\*\*\* Riesgo 34. Retrasos en aprobaciones-licencias, Riesgo 54. Indisponibilidad de servicios en el sitio.

Tabla 7.7. Eventos reales causantes del retraso en el caso de estudio.

| Riesgo      |           | Eventos causantes del retraso real del proyecto                                                   |
|-------------|-----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|
| No modelado | Modelado  |                                                                                                   |
| Riesgo 34   | -         | Retraso en trámite y aprobación de licencia de construcción.                                      |
| Riesgo 54   | -         | Retraso en instalación tardía de los servicios públicos, agua y energía.                          |
| -           | Riesgo 29 | Retraso por fuerte invierno.                                                                      |
| -           | Riesgo 18 | Incertidumbre sobre el alcance final de construcción entregable dentro del objeto del contrato.   |
| -           | Riesgo 8  | Retraso en el pago de la segunda cuota sobre obras ejecutadas.                                    |
| -           | Riesgo 6  | Retraso por imprevisto en la cimentación (Incremento de rellenos para desaguar al alcantarillado) |

Fuente: Elaboración Propia.

#### 7.3.6.2. Análisis estadístico

Los indicadores estadísticos obtenidos a partir de la simulación de @Risk indican que bajo la influencia de los riesgos modelados el proyecto presenta una tendencia a aumentos de la duración del proyecto por encima de la fecha pactada originalmente en el proyecto.

Esta promesa, radicada en el contrato original de la obra, corresponde a 157 días laborales a partir del 25 de noviembre de 2011, es decir, al día 22 de mayo de 2012. Al comparar la duración media del proyecto obtenida en la simulación (correspondiente a 189 días) con la fecha de finalización contratada, es evidente que la simulación sugiere una probabilidad de cumplimiento nula para esta promesa. El modelo probabilístico señala una confiabilidad del 0% para esta fecha de entrega del proyecto ya que se ubica por debajo del valor mínimo de la fecha de entrega del proyecto (25 de mayo de 2012), esto quiere decir, que al considerar las condiciones de incertidumbre y no solo el modelo determinístico no es posible terminar el proyecto para la fecha contratada.

Por su parte, el sesgo da como resultado un valor positivo, el cual representa que los datos tienden a ubicarse al lado derecho de la distribución. Esta situación, vislumbra una ligera tendencia al aumento de la duración total del proyecto. Lo cual puede ser explicado por el comportamiento de las duraciones definidas de los riesgos potenciales ya que presentan también una ligera tendencia al límite superior.

Fuera de esto, las distribuciones de la duración del proyecto y de la fecha de entrega del proyecto presentan una forma leptocúrtica en la distribución de sus datos (presentan coeficientes de curtosis positivos), lo que en combinación con la asimetría positiva de las distribuciones hacen al proyecto propenso a eventos extremos y más aún a aquellos referentes a mayores retrasos en la duración total del proyecto.

### **7.3.6.3. Priorización de los riesgos y Análisis del diagrama de tornado**

En este apartado se propone la priorización de los riesgos modelados, mediante el rango de variabilidad de la media de la duración total del proyecto, generado por cada riesgo y el cual es presentado en el diagrama de tornado generado por @Risk (Figura 7.3, lado izquierdo). (Es importante aclarar, que los resultados de ambos diagramas de tornado son los mismos en términos de la priorización de los riesgos, por lo que el análisis en este apartado solo se hace referencia al concerniente de la duración).

Este diagrama según el manual de @Risk es “un análisis de sensibilidad gráfico, que despliega una jerarquización de las variables de entrada que impactan a una variable de salida del modelo. Las variables de entrada que poseen un mayor impacto sobre la distribución de la variable de salida poseerán las barras más largas en el gráfico”.

Según el manual de @Risk, el diagrama de tornado de cambio en estadísticas de salida, se realiza de tal manera que la entradas se ordenan primero en orden ascendente y se compartimentalizan en diez escenarios, junto con el resultado de la salida para cada iteración, luego se calcula la media de la salida sólo para las iteraciones de cada compartimento. La media más baja de las diez medias de las salidas es el número situado en el límite izquierdo de la barra del gráfico tornado para esa entrada, y la media más alta de las diez medias de las salidas representa el número situado en el límite derecho de la barra. De esta manera las entradas se clasifican y organizan por el rango entre el valor estadístico más alto de cualquier de sus compartimentos y el valor estadístico más bajo.

En resumen lo que busca el método descrito anteriormente, es hacer visible una correlación entre las entradas y las salidas. Al organizar las entradas de mayor a menor, si la entrada realmente tiene un gran impacto sobre la salida, se espera que la salida tenga el mismo comportamiento, es decir, que tome valores más altos a medida que las entradas también los toma, lo que se refleja en que los valores máximos y mínimos de la media de la salida, sean más distantes entre sí. Esto quiere decir que entre más grande sea el rango de variación de la media de salida, la entrada respectiva tiene un gran efecto sobre la salida.

Por otro lado si no existe dicha correlación o es muy poca la que existe, los valores más altos de la salida, están distribuidos en cualquier compartimiento de análisis, generando así un equilibrio en las medias de todos los compartimientos y haciendo que los valores máximos y mínimos de la media de la salida, sean más similares entre sí. Esto quiere decir que entre más pequeño sea el rango de variación de la media de salida, la entrada respectiva no tiene un gran efecto sobre la salida.

Para comprender el diagrama de tornado, es de vital importancia aclarar el significado de los valores presentados en el diagrama que se obtuvo en los resultados (Figura 7.3). El valor mínimo de la media de la duración total del proyecto para cada riesgo, representa la situación cuando el riesgo precisamente no ocurre ni mucho menos tiene algún impacto, mientras los demás riesgos pueden que sí o pueden que no ocurran. Por otro lado el valor

máximo de cada riesgo en el diagrama, representa la situación contraria en la que el riesgo si ocurre y el impacto total del riesgo toma su mayor valor.

Esto explica el hecho de que justamente los riesgos que más afectan a la duración total del proyecto, tengan los valores mínimos más bajos de la media de la duración total, en comparación a los demás riesgos. Esto sucede pues al no generarse ese gran impacto en la duración del proyecto, esta no aumenta en mayor medida. Por otro lado se explica que los riesgos que menos afectan a la duración total del proyecto, su valor mínimo es muy cercano de la media de la duración total arrojada por la simulación (189,55 días), ya que como los demás riesgos están generando impacto sobre la duración, la media de la duración se acerca a la tendencia central en la simulación.

De esta manera, el rango de los valores de la media de la duración total del proyecto, muestra el nivel en el cual la duración total es afectada solamente por el impacto total del riesgo en específico. Debido a esta propiedad, dicho rango es el elemento de priorización que se utiliza en el diagrama de tornado, cómo se observa en la Tabla 7.8., (adaptada del diagrama de tornado).

Tabla 7.8. Riesgos priorizados según rango de variabilidad de la media de la duración total del proyecto basado en el diagrama de tornado.

| ID | Descripción                                                                                | RANGO (días) | MIN (días) | MAX (días) |
|----|--------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|------------|------------|
| 4  | Retraso en el desarrollo de la obra por inconsistencias o falta de claridad en los diseños | 43,80        | 171,78     | 215,57     |
| 18 | Tomas de decisiones lentas del dueño del proyecto                                          | 16,55        | 182,59     | 199,14     |
| 6  | Problemas técnicos imprevistos en construcción                                             | 15,93        | 185,45     | 201,38     |
| 29 | Efectos del clima lluvioso en las actividades de construcción                              | 4,95         | 189,06     | 194,01     |
| 28 | Condiciones del terreno imprevistas                                                        | 4,54         | 188,75     | 193,28     |
| 20 | Suspensión del trabajo por parte del contratante                                           | 3,38         | 187,49     | 190,88     |
| 31 | Retrasos en resolver los problemas contractuales                                           | 2,97         | 188,11     | 191,07     |
| 32 | Retrasos en resolver disputas con partes interesadas                                       | 2,91         | 188,08     | 190,99     |
| 8  | Dificultades financieras de contratistas                                                   | 2,49         | 189,30     | 191,79     |
| 41 | Retrasos - Incumplimiento de subcontratistas                                               | 2,21         | 189,33     | 191,54     |

Fuente: Elaboración propia.

Es importante considerar que el riesgo número 4 tiene un rango mucho mayor con respecto a los demás y que los Riesgos 18 y 6, tienen un rango muy similar, por lo que estos dos se pueden considerar de igual importancia (16,55 días y 15,93 días respectivamente). Es de resaltar que los datos puntuales de la variación máxima generada muestran que los Riesgos 4 y 6 son los que se relacionan con los mayores aumentos en la duración y fecha de finalización, al presentar los mayores valores máximos provocado con 215,57 días (Riesgo 4) y 201,38 días (Riesgo 6).

También es relevante comentar, que los demás riesgos tienen un rango de variación muy similar, lo que implica que el impacto en la duración total de proyecto de estos riesgos es parecido y que la ocurrencia de estos no incrementa en mayor medida la duración del proyecto, como si lo hacen los tres primeros. Sin embargo a pesar de sus similitudes, se logra diferenciar los riesgos Efectos del clima lluvioso en las actividades de construcción (Riesgo 29) y Condiciones del terreno imprevistas (Riesgo 28), ya que en promedio el



rango de variación de estos dos riesgos es un 70% superior al promedio del rango de variación de los otros cinco riesgos no tan relevantes.

Esta priorización coincide con el hecho de que los tres riesgos principales son los que tienen un mayor número de relaciones riesgo-actividad, y también que los dos primeros riesgos, son de los que presentan una mayor probabilidad de ocurrencia, al igual que de las más drásticas definiciones de impacto potencial. Esto sugiere que hay una relación proporcional, entre la cantidad de relaciones Riesgo-Actividad y las definiciones de alta probabilidad y alto impacto potencial.

#### **7.3.6.4. Comparación de simulaciones**

Con el fin de observar la estabilidad de los resultados previamente descritos, se realizaron dos simulaciones más, garantizando el cambio en la semilla de inicio de la muestra. Esto permitió validar que los riesgos que más afectan a la duración total del proyecto, efectivamente lo son, a pesar de las diversas posibilidades generadas en cada simulación. Por otro lado se reveló que el comportamiento de la distribución de la duración total del proyecto fue muy similar al resultado inicial.

Se compararon los resultados en términos de la duración total del proyecto y su distribución probabilística. Como se puede observar en la Tabla 7.9., todas las medidas de tendencia, dispersión y distribución no difieren mucho entre sí, de hecho el porcentaje de mayor cambio de los estadísticos de los resultados de la simulación dos con respecto a la primera es un 3,32% correspondiente a la desviación estándar, por otro lado el porcentaje de mayor cambio de los estadísticos de los resultados de la simulación tres con respecto a la primera es un -11% correspondiente a la asimetría o sesgo.

Tabla 7.9. Tabla resumen resultados estadísticos simulaciones.

| <b>Estadístico</b> | <b>Simulación1</b> | <b>Simulación2</b> | <b>Simulación3</b> |
|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| <b>Mínimo</b>      | 157                | 157                | 157                |
| <b>Máximo</b>      | 237,85             | 241                | 254,619            |
| <b>Media</b>       | 189,553            | 189,822            | 189,641            |
| <b>Moda</b>        | 157                | 157                | 157                |
| <b>Mediana</b>     | 188,400            | 189,458            | 188,769            |
| <b>Desv Est</b>    | 17,419             | 17,998             | 18,010             |
| <b>Asimetría</b>   | 0,2251             | 0,2201             | 0,24430            |
| <b>Curtosis</b>    | 2,4539             | 2,3804             | 2,59               |

Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, se evaluó la estabilidad de los riesgos, la cual se le atribuye a la permanencia en la posición de importancia en el diagrama de tornado generado por el @Risk en cada simulación.

En este sentido, la selección de los riesgos más importantes es estable, ya que los tres primeros riesgos arrojados en la primera simulación también fueron los tres primeros en las demás simulaciones (Tabla 7.10.). Sin embargo, los resultados demuestran que los demás riesgos, pueden variar en términos de importancia. Por ejemplo, para la simulación uno el riesgo identificado con el número 29 quedó en la cuarta posición de importancia, en cambio en la segunda simulación quedó en la posición octava y en la tercera simulación en la posición quinta. Esto quiere decir que cada uno de estos riesgos genera un impacto muy similar en la duración total del proyecto, como previamente se resaltó.

Tabla 7.10. Posicionamiento de los riesgos en las simulaciones.

| <b>Posición</b> | <b>Simulación1<br/>(ID Riesgo)</b> | <b>Simulación2<br/>(ID Riesgo)</b> | <b>Simulación3<br/>(ID Riesgo)</b> |
|-----------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| <b>1</b>        | 4                                  | 4                                  | 4                                  |
| <b>2</b>        | 18                                 | 6                                  | 18                                 |
| <b>3</b>        | 6                                  | 18                                 | 6                                  |
| <b>4</b>        | 29                                 | 28                                 | 20                                 |
| <b>5</b>        | 28                                 | 20                                 | 29                                 |
| <b>6</b>        | 20                                 | 31                                 | 32                                 |
| <b>7</b>        | 31                                 | 32                                 | 28                                 |
| <b>8</b>        | 32                                 | 29                                 | 31                                 |
| <b>9</b>        | 8                                  | 41                                 | 41                                 |
| <b>10</b>       | 41                                 | 8                                  | 8                                  |

Fuente: Elaboración Propia.

Debido a la estabilidad demostrada anteriormente, es posible ratificar los resultados de la primera simulación, los cuales afirman que los riesgos, Retraso en el desarrollo de la obra por inconsistencias o falta de claridad en los diseños, Tomas de decisiones lentas del dueño del proyecto y Problemas técnicos imprevistos en construcción, son definitivamente los riesgos prioritarios de mayor impacto en la duración total de proyecto.

#### **7.3.6.5. Ventajas y Limitaciones**

La principal ventaja del modelo propuesto es que se simplifica la introducción de los datos de entrada lo que permite evaluar redes de actividades de proyectos de mayor robustez, permitiendo realizar un análisis de sensibilidad de los riesgos sobre la duración total del proyecto.

Es importante comentar que el modelo posee limitaciones, como cualquier otro, varias de estas vienen de las propuestas adaptadas, como por ejemplo que el cálculo de los valores de influencia del riesgo no consideran la posibilidad de que haya solo un tipo de clasificación, lo que implica que en la definición de estos grados de influencia como mínimo debe haber una relación efectiva y muy efectiva para cada actividad en consideración. Otras limitaciones están asociadas a la obtención de los datos subjetivos, al detalle del efecto de los riesgos en las actividades, a la no inclusión directa de la correlación entre riesgos, etc.

## **8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

En este proyecto de grado, fue llevada a cabo una priorización de los riesgos a los que están expuestos los proyectos de obra civil de la Universidad del Valle utilizando un nuevo enfoque de análisis cuantitativo de riesgos de programa. Dicho enfoque, permite comprender y modelar mediante la técnica de Simulación Monte Carlo el comportamiento de la programación de obra bajo las condiciones de riesgo de la Universidad y de esta manera sentar las bases para futuros planes de respuesta según la priorización realizada a estos riesgos.

En el sector de construcción existen diferentes factores de riesgo, los cuales tornan compleja la modelación de su impacto en la programación de obra. Esta complejidad está determinada principalmente en función del número de factores de riesgos a considerar y la manera de establecer la relación riesgo – impacto en la duración total del proyecto, por lo tanto es importante identificarlos y priorizarlos, de acuerdo a las características del entorno de la Universidad.

En línea con este propósito, se logró sintetizar una lista con 55 riesgos a los que están expuestos los proyectos de obra civil de la Universidad del Valle. Estos riesgos fueron caracterizados de manera cualitativa en términos de su probabilidad de ocurrencia, impacto en los proyectos y la facilidad de detectarlos una vez han ocurrido, características en función de las que se determinaron los 10 riesgos modelados en el modelo propuesto. Adicionalmente, los riesgos se categorizaron según un modelo de estructura de desglose de riesgos adaptado al entorno de los riesgos estudiados, encontrando que la mayoría de los riesgos tienen como origen el contratista.

Por otro lado, se caracterizaron diferentes estructuras metodológicas basadas en Simulación Monte Carlo para análisis cuantitativo de riesgos en proyectos de obra. De la revisión en detalle de sus características, se encontró que los mayores problemas a implementar en la modelación de la programación de obra bajo condiciones de incertidumbre es la formulación de las relaciones entre el impacto generado por los riesgos y las actividades a ejecutar en la obra, así como la determinación de las funciones estadísticas de los riesgos a modelar; esto último, debido a la poca o nula información histórica con la que se cuenta en el sector constructivo de estos riesgos y más aún en la Universidad del Valle. Lo que obliga a utilizar como datos de entrada a cualquier propuesta de modelación en este entorno el juicio de expertos como principal herramienta para caracterizar el comportamiento de las variables a estudiar. Hecho que incorpora al comportamiento de las variables objeto de estudio el efecto de las calificaciones subjetivas de los expertos.

Además, como las relaciones parten del juicio de expertos, determinar cualquier característica para las relaciones entre riesgos y actividades para un proyecto real ocasionan dificultades a la hora de recoger los datos por el gran número de relaciones a definir si se toman en consideración todas las actividades del proyecto. Fuera de esto, no existe una única manera de determinar la duración total del proyecto, ya que todas las propuestas

consultadas plantean diferentes enfoques para modelar el cálculo de la duración. En cuanto al impacto del riesgo, es compleja la definición del mismo, ya que depende de factores como el nivel de desagregación desde el que se define el riesgo, la etapa de la obra en que ocurre el riesgo e incluso otros factores como la finalidad del proyecto, época del año en que se realiza, entre otros. Lo que hace ambigua cualquier modelación generalizada del impacto del riesgo pero demasiado extensiva en complejidad y trabajo cualquier definición que pretenda recoger con alto grado de minuciosidad el impacto del riesgo de manera cuantitativa.

Del análisis de estas características se diseñó la estructura metodológica a aplicar ajustándola a las restricciones a las que estuvo sujeto el proyecto de grado, como la disponibilidad de datos y los requerimientos de agilidad para obtenerlos y la finalidad fundamental del proyecto de lograr una priorización sustentada en el análisis cuantitativo. Proceso del que se sintetizó el modelo propuesto, un enfoque de análisis cuantitativo de riesgos basado en simulación Monte Carlo desarrollado con el propósito de evaluar redes de actividades de construcción bajo incertidumbre, con el objetivo de determinar el tiempo total de terminación de una obra. Enfoque que contempla, el impacto directo de factores de riesgo, las relaciones riesgo - actividad y la distribución del impacto de los riesgos sobre estas actividades. De esta manera, el modelo permite prioriza los riesgos en función de la variabilidad provocada en la duración total del proyecto. La lógica operacional del modelo y una aplicación a un caso de estudio es incluida en el presente proyecto, así como las limitaciones del modelo.

La estructura metodológica fue diseñada propiciando la facilidad en el levantamiento de los datos de entrada para el modelo. En este proyecto, los programas MS Excel, MS Project y @Risk fueron usados para la ejecución del modelo.

Los parámetros de entrada para el modelo propuesto se basan en el juicio de expertos y la intuición del calificador. Esta característica, propicia una debilidad en el modelo debido a la subjetividad de los datos utilizados, por lo que es de especial importancia los expertos a consultar para la realización de la simulación. Sin embargo, los resultados parciales de la aplicación del modelo propuesto en este proyecto de grado sugieren que el modelo funciona de manera adecuada y produce resultados realistas al obtener un error mínimo en la estimación de la duración del proyecto caso de estudio, frente a los datos reales. A pesar de esto, el modelo propuesto debe ser aplicándolo en otros casos de estudio para ser completamente validado.

En general, el modelo propuesto demuestra ser una estructura metodológica práctica para el análisis cuantitativo de riesgos en el marco de la Gestión de Riesgos en Proyectos, al tomar en cuenta componentes estocásticos en su estructura, aportar grados de confiabilidad a las fechas de entrega del proyecto y proporcionar informes estadísticos que permiten visualizar de una manera integral el comportamiento del proyecto a evaluar.

En cuanto a la priorización de los riesgos, la estructura estocástica del modelo le da mayor robustez al análisis del impacto de los riesgos, el cual se materializa mediante un diagrama

de tornado. A partir de este análisis de impacto, se determina que los eventos de mayor impacto en los proyectos de obra civil en la Universidad del Valle son: los retrasos en el desarrollo de la obra por inconsistencia en los diseños (riesgo 4), la toma de decisiones lentas por parte del contratante (riesgo 18) y los problemas técnicos imprevistos en construcción (riesgo 6). Esto se sustenta además, en que al realizar varias simulaciones se mantienen invariables estos riesgos como los de mayor impacto cuantitativo; que de la selección de los riesgos a modelar desde sus características cualitativas también se encuentran entre los de mayor relevancia; y también a lo particular y homogéneo del entorno de los proyectos sobre los que se generaliza la priorización de estos riesgos, es decir, los proyectos de Obra Civil de la Universidad del Valle.

Futuras investigaciones podrían encaminarse a considerar los siguientes aspectos:

- Considerar que las actividades pueden tener una variación natural y una variación inherente al impacto de los riesgos. Dentro de esta formulación, tomar en cuenta para los parámetros de las variaciones naturales alusivos a la duración mínima, esperada y máxima el análisis de los recursos disponibles para el proyecto.
- Considerar otros objetivos en el proyecto como los costos o calidad del proyecto.
- Utilizar otras técnicas de programación de actividades.
- Vincular otras consideraciones técnicas de la programación de actividades como las restricciones de recursos.
- Incluir elementos en la modelación de las redes de actividades como adición de actividades al ocurrir eventos adversos, correlación entre riesgos, correlación entre actividades, entre otros.

## 9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ahmed, S. M., Ahmad, R., Saram, D., & Darshi, D. (1999). Risk management trends in the Hong Kong construction industry: a comparison of contractors and owners perceptions. *Engineering construction and Architectural management*, 6(3), 225-234.
- Andi. (2006). The importance and allocation of risks in Indonesian construction projects. *Construction Management and Economics*, 24(1), 69-80.
- Arquer, (2007). *Fiabilidad Humana: Métodos de Cuantificación, Juicio de Expertos*. Ministerio del Trabajo y Asuntos Sociales de España.
- Assaf, S. A., & Al-Hejji, S. (2006). Causes of delay in large construction projects. *International journal of project management*, 24(4), 349-357.
- Aziz, R. F. (2013). Ranking of delay factors in construction projects after Egyptian revolution. *Alexandria Engineering Journal*, 52(3), 387-406.
- Cano, Sandra. & Rubiano, Oscar (2013). Estudio de Factores que Inciden en el Flujo de la Gestión de Ejecución de Proyectos de Construcción de Infraestructura Universitaria. XI Congreso Latinoamericano de Dinámica de Sistemas, Instituto Tecnológico De Monterrey.
- Carbone, T. A., & Tippet, D. D. (2004). Project Risk Management Using the Project Risk FMEA. *Engineering Management Journal*, 16(4).
- Perez A., Borrero A., 2011. Análisis del riesgo de programa en el sector de la construcción para determinar su impacto en la duración de los proyectos. Caso de estudio: proyecto de vivienda en Cali.
- Chan, D. W., & Kumaraswamy, M. M. (1997). A comparative study of causes of time overruns in Hong Kong construction projects. *International Journal of project management*, 15(1), 55-63.
- Dey, P. K. (2010). Managing project risk using combined analytic hierarchy process and risk map. *Applied Soft Computing*, 10(4), 990-1000.
- El-Sayegh, S. M. (2008). Risk assessment and allocation in the UAE construction industry. *International Journal of Project Management*, 26(4), 431-438.
- Flanagan, R., & Norman, G. (1993). *Risk management and construction*. Oxford: Blackwell Scientific.
- Galway, L. (2004). *Quantitative Risk Analysis for Project Management*. RAND Corporation, <http://sbir.nasa.gov/SBIR/successes/ss/10-018text.html>.
- Kangari, R. (1995). Risk management perceptions and trends of US construction. *Journal of Construction Engineering and Management*, 121(4), 422-429.

- Kartam, N. A., & Kartam, S. A. (2001). Risk and its management in the Kuwaiti construction industry: a contractors' perspective. *International journal of project management*, 19(6), 325-335.
- Ling, F. Y. Y., & Hoi, L. (2006). Risks faced by Singapore firms when undertaking construction projects in India. *International Journal of Project Management*, 24(3), 261-270.
- Lledó, P., & Rivarola, G. (2007). *Gestión de Proyectos (Cómo Dirigir Proyectos Exitosos, Coordinar los Recursos Humanos y Administrar los Riesgos)*. Editorial Prentice Hall, primera edición. Págs, 1-3.
- Luu, V. T., Kim, S. Y., Tuan, N. V., & Ogunlana, S. O. (2009). Quantifying schedule risk in construction projects using Bayesian belief networks. *International Journal of Project Management*, 27(1), 39-50.
- Odeh, A. M., & Battaineh, H. T. (2002). Causes of construction delay: traditional contracts. *International Journal of Project Management*, 20(1), 67-73.
- Oficina de Planeación y Desarrollo Institucional (OPDI). (2012). Universidad del Valle. "Univalle en cifras semestre I."
- Oficina de Planeación y Desarrollo Institucional (OPDI). (2012). Universidad del Valle. Informe de Gestión 2011. 106.
- Ökmen, Ö., & Öztaş, A. (2008). Construction project network evaluation with correlated schedule risk analysis model. *Journal of Construction Engineering and Management*, 134(1), 49-63.
- Öztaş, A., & Ökmen, Ö. (2004). Risk analysis in fixed-price design-build construction projects. *Building and environment*, 39(2), 229-237.
- Öztaş, A., & Ökmen, Ö. (2005). Judgmental risk analysis process development in construction projects. *Building and Environment*, 40(9), 1244-1254.
- Palisade Corporation. (2013). Guía para el uso de @RISK Programa de complemento para el análisis y simulación de riesgos en Microsoft® Excel Versión 6.
- Périssé, M. C., & Pepe, M. L. (2006). Una Aplicación del Método de Monte Carlo en el Análisis de Riesgo de Proyectos: Su automatización a través de una planilla de cálculo.
- PMI, 2009. The Practice Standard for Project Risk Management. Project Management Institute, Inc., Newtown Square, Pa.
- PMI, A. (2008). Guide to the Project Management of Knowledge (PMBOK), PMI, USA.
- Univalle, O. d. P. y. D. I. (2012). "Univalle en cifras semestre I."

Uzzafer, M. (2010). A New Dimension in Software Risk Management. (2010). World Academy of Science, Engineering & Technology, 64, 340-344.

Vanhoucke, M. (2012). Measuring the efficiency of project control using fictitious and empirical project data. International Journal of Project Management, 30(2), 252-263.

Wallace, I. (2010). Schedule risk and contingency using @RISK and probabilistic analysis. White Papers, Artículo web de Palisade Corporation.

Wang, S. Q., Dulaimi, M. F., & Aguria, M. Y. (2004). Risk management framework for construction projects in developing countries. Construction Management and Economics, 22(3), 237-252.

Zhang, Z., & Chu, X. (2011). Risk prioritization in failure mode and effects analysis under uncertainty. Expert Systems with Applications, 38(1), 206-214.

Zhi, H. (1995). Risk management for overseas construction projects. International journal of project management, 13(4), 231-237.



## 10. ANEXOS

### Anexo 1. Lista de riesgos identificados.

| ID | RIESGO                                                                              |
|----|-------------------------------------------------------------------------------------|
| 1  | Retraso en el pago de los contratantes a los contratistas                           |
| 2  | Retraso en obtener el acceso al sitio y el derecho de paso                          |
| 3  | Accidentes durante la construcción                                                  |
| 4  | Problemas técnicos imprevistos en construcción                                      |
| 5  | Falta o partida de personal calificado                                              |
| 6  | Retraso de material por parte de los proveedores                                    |
| 7  | Problemas de calidad de suministros o materiales                                    |
| 8  | Huelgas y conflictos de la mano de obra                                             |
| 9  | Retrasos en aprobaciones-licencias                                                  |
| 10 | Inflación y cambios repentinos de los precios                                       |
| 11 | Escasez de material y suministros                                                   |
| 12 | Escasez de mano de obra y disponibilidad                                            |
| 13 | Escasez de equipo y disponibilidad                                                  |
| 14 | Condiciones del terreno imprevistas                                                 |
| 15 | Retrasos en resolver los problemas contractuales                                    |
| 16 | Retrasos en resolver disputas con partes interesadas                                |
| 17 | Proteccionismo local (Medio ambiente)                                               |
| 18 | Dificultades financieras del contratante                                            |
| 19 | Dificultades financieras de contratistas                                            |
| 20 | Trabajos defectuosos y reprocesos                                                   |
| 21 | Retrasos - Incumplimiento de subcontratistas                                        |
| 22 | Tomas de decisiones lentas del dueño del proyecto                                   |
| 23 | Retrasos por métodos de construcción                                                |
| 24 | Problemas con las vecindades                                                        |
| 25 | Fallas de comunicación entre el contratante y el contratista                        |
| 26 | Fallas de comunicación entre el interventor y el contratista                        |
| 27 | Conflictos entre los copropietarios del proyecto                                    |
| 28 | Suspensión del trabajo por parte del contratante                                    |
| 29 | Conflictos en la programación de los subcontratos durante la ejecución del proyecto |
| 30 | Cambio de subcontrataciones por su ineficiente trabajo                              |
| 31 | Retrasos en el desarrollo de las pruebas e inspecciones por los consultores         |
| 32 | Revisión y aprobación lenta de documentos de diseño por parte del consultor         |
| 33 | Conflictos entre el consultor y los ingenieros de obra                              |
| 34 | Cambios en las especificaciones y tipos de materiales durante la construcción       |
| 35 | Daños en los materiales pedidos cuando son necesarios urgentemente                  |

|    |                                                                                                                                                                            |
|----|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 36 | Retrasos en la manufactura de materiales especiales de construcción                                                                                                        |
| 37 | Daños en los equipos                                                                                                                                                       |
| 38 | Efectos del clima caliente en las actividades de construcción                                                                                                              |
| 39 | Efectos del clima lluvioso en las actividades de construcción                                                                                                              |
| 40 | Indisponibilidad de servicios en el sitio                                                                                                                                  |
| 41 | Retrasos en el desarrollo de las inspecciones finales y certificaciones por una tercera parte                                                                              |
| 42 | Mala interpretación en los diseños                                                                                                                                         |
| 43 | Escasez y disponibilidad de medios de transporte                                                                                                                           |
| 44 | Retraso en el desarrollo de la obra por alteración del orden público                                                                                                       |
| 45 | Daño en obra ejecutada por vandalismo o saqueo durante alteración del orden publico                                                                                        |
| 46 | Hurtos a material, equipo y herramienta del Contratista                                                                                                                    |
| 47 | Retraso en el desarrollo de la obra por solicitud del usuario o de las áreas competentes debido factores inherentes a la obra                                              |
| 48 | Retraso en el desarrollo de la obra por inconsistencias o falta de claridad en los diseños                                                                                 |
| 49 | Retraso en el retiro de material desinstalado en obra y que no está a cargo del contratista su retiro                                                                      |
| 50 | Retraso en el desarrollo de la obra por variaciones al diseño inicial o falta de definición de las áreas competentes                                                       |
| 51 | No ejecución de la actividad contratada en la propuesta ofertada, por omisión de componentes necesarios para desarrollar la actividad correctamente para su funcionamiento |
| 52 | Incumplimiento en el pago de obligaciones laborales y honorarios                                                                                                           |
| 53 | Inconsistencias en las secuencias o procedencias del programa que puedan afectar la oportuna ejecución del servicio.                                                       |
| 54 | Variación en las condiciones de financiación, tasas de cambio, tasas de créditos, etc.                                                                                     |
| 55 | Conflictos entre los Interventores y los ingenieros de obra                                                                                                                |
| 56 | Retrasos en la aprobación del interventor de los avances de obra                                                                                                           |
| 57 | Fallas en el juicio del interventor                                                                                                                                        |
| 58 | Demora en la entrega de información por parte de los asesores                                                                                                              |
| 59 | Entrega de información incompleta por parte de los asesores                                                                                                                |
| 60 | Conflictos entre los consultores y los ingenieros de diseño                                                                                                                |
| 61 | Inefectiva planeación y programación del proyecto                                                                                                                          |
| 62 | Tecnología obsoleta                                                                                                                                                        |
| 63 | Políticas inadecuadas del contratista                                                                                                                                      |
| 64 | Pobre uso de software avanzado de ingeniería                                                                                                                               |
| 65 | Modo de financiación y pago para completar el trabajo                                                                                                                      |

**Anexo 2. Lista de riesgos definitiva evaluada con el RFMEA.**

| <b>ID</b> | <b>Descripción</b>                                                                                                            |
|-----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1         | Retrasos en el desarrollo de las pruebas e inspecciones por los consultores                                                   |
| 2         | Revisión y aprobación lenta de documentos de diseño por parte del consultor                                                   |
| 3         | Conflictos entre el consultor y los ingenieros de obra                                                                        |
| 4         | Retraso en el desarrollo de la obra por inconsistencias o falta de claridad en los diseños                                    |
| 5         | Accidentes durante la construcción                                                                                            |
| 6         | Problemas técnicos imprevistos en construcción                                                                                |
| 7         | Falta o partida de personal calificado                                                                                        |
| 8         | Dificultades financieras de contratistas                                                                                      |
| 9         | Trabajos defectuosos y reprocesos                                                                                             |
| 10        | Retrasos por métodos de construcción                                                                                          |
| 11        | Conflictos en la programación de los subcontratos durante la ejecución del proyecto                                           |
| 12        | Daños en los materiales pedidos cuando son necesitados urgentemente                                                           |
| 13        | Daños en los equipos                                                                                                          |
| 14        | Mala interpretación en los diseños                                                                                            |
| 15        | Retraso en el pago de los contratantes a los contratistas                                                                     |
| 16        | Retraso en obtener el acceso al sitio y el derecho de paso                                                                    |
| 17        | Dificultades financieras del contratante                                                                                      |
| 18        | Tomas de decisiones lentas del dueño del proyecto                                                                             |
| 19        | Conflictos entre los copropietarios del proyecto                                                                              |
| 20        | Suspensión del trabajo por parte del contratante                                                                              |
| 21        | Cambios en las especificaciones y tipos de materiales durante la construcción                                                 |
| 22        | Retraso en el desarrollo de la obra por solicitud del usuario o de las áreas competentes debido factores inherentes a la obra |
| 23        | Inflación y cambios repentinos de los precios                                                                                 |
| 24        | Escasez de material y suministros                                                                                             |
| 25        | Escasez de mano de obra y disponibilidad                                                                                      |
| 26        | Escasez de equipo y disponibilidad                                                                                            |
| 27        | Escasez y disponibilidad de medios de transporte                                                                              |
| 28        | Condiciones del terreno imprevistas                                                                                           |
| 29        | Efectos del clima lluvioso en las actividades de construcción                                                                 |
| 30        | Fallas de comunicación entre el contratante y el contratista                                                                  |
| 31        | Retrasos en resolver los problemas contractuales                                                                              |
| 32        | Retrasos en resolver disputas con partes interesadas                                                                          |
| 33        | Huelgas y conflictos de la mano de obra                                                                                       |
| 34        | Retrasos en aprobaciones-licencias                                                                                            |
| 35        | Retrasos en el desarrollo de las inspecciones finales y certificaciones por una tercera parte                                 |
| 36        | Retraso de material por parte de los proveedores                                                                              |

|    |                                                                                                                      |
|----|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 37 | Problemas de calidad de suministros o materiales                                                                     |
| 38 | Retraso en el desarrollo de la obra por alteración del orden público                                                 |
| 39 | Daño en obra ejecutada por vandalismo o saqueo durante alteración del orden publico                                  |
| 40 | Hurtos a material, equipo y herramienta del Contratista                                                              |
| 41 | Retrasos - Incumplimiento de subcontratistas                                                                         |
| 42 | Cambio de subcontrataciones por su ineficiente trabajo                                                               |
| 43 | Retraso en el desarrollo de la obra por variaciones al diseño inicial o falta de definición de las áreas competentes |
| 44 | Variación en las condiciones de financiación, tasas de cambio, tasas de créditos, etc.                               |
| 45 | Conflictos entre los Interventores y los ingenieros de obra                                                          |
| 46 | Retrasos en la aprobación del interventor de los avances de obra                                                     |
| 47 | Fallas en el juicio del interventor                                                                                  |
| 48 | Demora en la entrega de información por parte de los asesores                                                        |
| 49 | Entrega de información incompleta por parte de los asesores                                                          |
| 50 | Conflictos entre los consultores y los ingenieros de diseño                                                          |
| 51 | Inefectiva planeación y programación del proyecto                                                                    |
| 52 | Políticas inadecuadas del contratista                                                                                |
| 53 | Modo de financiación y pago para completar el trabajo                                                                |
| 54 | Indisponibilidad de servicios en el sitio                                                                            |
| 55 | Inconsistencias en las secuencias o precedencias del programa que puedan afectar la oportuna ejecución del servicio  |