



Universidade de Vigo

Trabajo Fin de Máster

Una revisión sobre softwares de gestión de riesgos en proyectos

Michele Dafonte Barbosa

Máster en Técnicas Estadísticas
curso 2023-2024

Propuesta de Trabajo Fin de Máster

<p>Título en galego: Unha revisión sobre software de xestión de proxectos</p>
<p>Título en español: Una revisión sobre softwares de gestión de riesgos en proyectos</p>
<p>English title: A review on project risk management softwares</p>
<p>Modalidad: Modalidad A</p>
<p>Autor/a: Michele Dafonte Barbosa, Universidade da Coruña</p>
<p>Director/a: María Luísa Carpenente Rodríguez, Universidade da Coruña</p>
<p>Breve resumen del trabajo:</p> <p>La Gestión de riesgos en proyecto incluye los procesos de la realización de la planificación, identificación, análisis, planificación e implementación de respuestas y el seguimiento de riesgos en un proyecto. Cuando el análisis de Monte Carlo se aplica a la evaluación de riesgos, permite la ejecución de simulaciones de escenarios (<i>what-if</i>) para identificar el impacto de los riesgos para los diferentes escenarios e identificar los posibles resultados según cada riesgo mapeado. Es programar en R funcionalidades que permitan aplicar esta metodología a los proyectos. Se utilizará un <i>software</i> ya existente en el mercado para facilitar la unión de funcionalidades en una única interfaz de fácil manejo, presentar los resultados de manera analítica y generar información general).</p>
<p>Recomendaciones:</p> <p>Vose D (2008) Risk analysis: A quantitative guide. John Wiley and Sons Ltd, West Sussex.</p> <p>Dosantos JCG (2022) Management of Deterministic and Stochastic Projects. Tesis, Universidade da Coruña.</p> <p>Project Management Institute (2017) A guide to the project management body of knowledge (PMBOK® guide)(6th ed.). Project Management Inst, Pennsylvania.</p>
<p>Otras observaciones:</p> <p>Conocimiento y manejo del software R.</p>

La directora propuesto para este TFM, Doña M^a Luisa Carpenle, no se responsabiliza del contenido de este Trabajo Fin de Máster por no haber tenido acceso a la versión que figura en esta memoria con la antelación suficiente, impidiendo que realizara sus observaciones antes del depósito de la misma.

Índice general

Resumen	IX
Prefacio	XI
1. Marco Teórico	1
1.1. Incertidumbre y riesgos en proyectos	1
1.2. La gestión de riesgos en proyectos	2
1.2.1. Planificación e identificación de riesgos	3
1.2.2. Análisis de riesgos cualitativo	4
1.2.3. Análisis de riesgos cuantitativo	4
1.2.3.1. Técnicas cuantitativas	4
1.2.3.2. Resultados de las simulaciones	7
1.2.4. Planificar respuestas a los riesgos	8
1.2.4.1. Estrategias de respuesta para riesgos negativos (amenazas)	8
1.2.4.2. Estrategias para riesgos positivos (oportunidades)	8
1.2.5. Implementar respuestas a los riesgos	8
1.2.6. Monitorear riesgos	9
1.2.6.1. El <i>Earned Value Management</i>	9
1.2.7. Gestión de riesgos de cronograma	12
1.2.7.1. Etapa 1. Estimación de la duración de las actividades	12
1.2.7.2. Etapa 2. Definir las relaciones de precedencia	13
1.2.7.3. Etapa 3. Cálculo de la ruta crítica	13
1.2.7.4. Etapa 4. Construir el modelo de simulación de cronograma	14
1.2.7.5. Etapa 5. Analizar e interpretar los resultados	15
1.2.7.6. Etapa 6. Gráfico de tornado e indicadores de sensibilidad del cronograma de proyectos	15
1.2.7.7. Etapa 7. Desarrollar planes de mitigación	18
1.2.7.8. Etapa 8. Monitoreo y control	18
1.2.8. Gestión de riesgos cronograma-costos	21
1.2.8.1. Etapa 1. Estimación de la duración y costos de las actividades	21
1.2.8.2. Etapa 2. Definir las relaciones de precedencia y asignar costos	22
1.2.8.3. Etapa 3. Correlación entre duraciones y costos	22
1.2.8.4. Etapa 4. Construir el modelo de simulación de cronograma y costos	22
1.2.8.5. Etapa 5. Identificación preliminar de costos críticos	23
1.2.8.6. Etapa 6. Analizar e interpretar los resultados	23
1.2.8.7. Etapa 7. Análisis de sensibilidad	24
1.2.8.8. Etapa 8. Desarrollar planes de mitigación	24
1.2.8.9. Etapa 9. Monitoreo y control	24

2. Los <i>softwares</i> de gestión de riesgos en proyectos	25
2.1. <i>Add-in</i> para simulación Monte Carlo: Análisis de riesgo cuantitativo	25
2.1.1. ModelRisk y ModelRisk ResultsViewer	26
2.1.2. @Risk	32
2.1.3. <i>Crystal Ball</i>	35
2.2. Softwares para riesgos en proyectos	38
2.2.1. Tamara	38
2.2.2. Primavera	42
2.3. Elección	43
3. Programación en R	47
3.1. El paquete ProjectManagement	47
3.2. Aplicación a un ejemplo práctico	50
3.2.1. Gestión de riesgos de cronograma	50
3.2.2. Gestión de riesgos de cronograma-costo	63
4. Conclusiones y trabajo futuro	81
A. Códigos en R	83
A.1. Apéndice A	83
A.2. Apéndice B	92
A.3. Apéndice C	100
Bibliografía	106

Resumen

Resumen en español

La Gestión de riesgos en proyecto incluye los procesos de la realización de la planificación, identificación, análisis, planificación e implementación de respuestas y el seguimiento de riesgos en un proyecto. Cuando el análisis de Monte Carlo se aplica a la evaluación de riesgos, permite la ejecución de simulaciones de escenarios (*what-if*) para identificar el impacto de los riesgos para los diferentes escenarios e identificar los posibles resultados según cada riesgo mapeado. Se utilizará un *software* que ya está en el mercado para facilitar la unión de funcionalidades en una única interfaz de fácil manejo, presentar los resultados de manera analítica y generar información general. El principal inconveniente es que la mayoría de los *softwares* asociados a la gestión de proyectos son pagos. El objetivo principal de este trabajo es resumir las funcionalidades de las aplicaciones disponibles en el mercado y programar algunas de sus funcionalidades en R.

English abstract

Project risk management includes the processes of conducting planning, identifying, analysing, planning responses, implementing responses and monitoring risks in a project. When Monte Carlo Analysis is applied to risk assessment, it allows the execution of scenario simulations (what-if) for: Identify the impact of risks for different scenarios and identify the possible results according to each risk mapped. Software already on the market will be used to facilitate the joining of functionalities in a single user-friendly interface, present the results analytically and graphically and generate general information. The main drawback is that the software associated with project management is paid software. The main objective of this work is to summarise the functionalities of the applications available on the market, and to program some of these functionalities with R.

Prefacio

En un escenario cada vez más interrelacionado y dinámico, el panorama empresarial acarrea nuevos riesgos e incertidumbre. Este momento es conocido como VUCA, un acrónimo en inglés de los factores: Volatilidad, incertidumbre, complejidad y ambigüedad, que para Bennett et al.(2014) describe la naturaleza de algunas condiciones y situaciones desafiantes en el entorno en el que las organizaciones operan y que por tratarse de fenómenos diferentes requieren respuestas diferentes. La volatilidad está asociada a la imprevisibilidad e inestabilidad del frecuente cambio. En la incertidumbre se entienden la causa y el efecto, pero se desconoce si un evento creará un cambio significativo. La complejidad se refiere a múltiples partes conectadas que forman una red de información y procedimientos que no es, necesariamente, volátil o incierta. La ambigüedad representa la falta de precedente para hacer predicciones debido a la falta de conocimiento y comprensión de las causas y efectos de los eventos y sus relaciones.

Una fuerte acción para hacer frente al mundo VUCA es el análisis de escenarios, pues actúa en la preparación de los posibles resultados y sus efectos, permitiendo así explorar hipótesis para tomar la mejor decisión. En sus múltiples funciones, la dirección de empresas y proyectos aprovecha las oportunidades de negocio y contrarresta las amenazas a este. Esta capacidad para la identificación y gestión de amenazas y oportunidades constituye una ventaja competitiva para el éxito del negocio.

De acuerdo con Böhle et al.(2016), un proyecto es una iniciativa de duración limitada diseñada para producir un producto, servicio o resultado único. Sin embargo, esta singularidad, a diferencia de las operaciones rutinarias, da como resultado proyectos plagados de imprevisibilidad. En consecuencia, la incertidumbre es una característica intrínseca y común de los proyectos.

El PMI (Project Management Institute, 2021), en la encuesta PMI 2021 Pulse of the Profession[®], ha recopilado las estadísticas de los años 2019, 2020 y 2021 en cuanto al porcentaje de proyectos que cumplieron los objetivos originales, la intención de negocios, y si se han completado dentro del presupuesto y a tiempo. Los resultados se encuentran abajo:

Como observado, en cuanto a los objetivos de línea de base (cronograma, presupuesto, alcance e intención de negocio) se aprecian estimaciones que aún pueden mejorar. Shenhar et al. (2007) afirman que muchos proyectos con todos los ingredientes del éxito aún fallan, y la razón es que los ejecutivos, gerentes y el equipo del proyecto no están acostumbrados a evaluar y analizar las incertidumbres. La gestión de riesgos es el área que tiene como objetivo mitigar y reducir esta incertidumbre en la medida de lo posible. A través de fases de proyecto establecidas, herramientas estandarizadas y métodos de buenas prácticas, los procesos del proyecto deberían volverse más predecibles, planificables y controlables. Böhle et al.(2016).

Schimitz et al. (2010) afirman que, a diferencia de la gestión de procesos que se ocupa de actividades que se repiten en el tiempo de manera que pueden ser estudiadas basándose en históricos, la base de estudios en proyectos posee una cantidad más pequeña de hechos y datos cuando se compara con los procesos, estando así expuesta a varios riesgos desconocidos. La falta de datos históricos dificulta la predicción, que, a pesar de no permitir afirmar la ocurrencia exacta de muchos fenómenos, permite estimar las probabilidades asociadas a diferentes estados que pueden asumir en un tiempo dado. Dichos fenómenos son conocidos como estocásticos y pueden modelarse a través de procesos estocásticos. Creemers et al. (2014).

El área de Gestión de Riesgos, el enfoque de riesgo convencional utiliza los procesos de planificación,

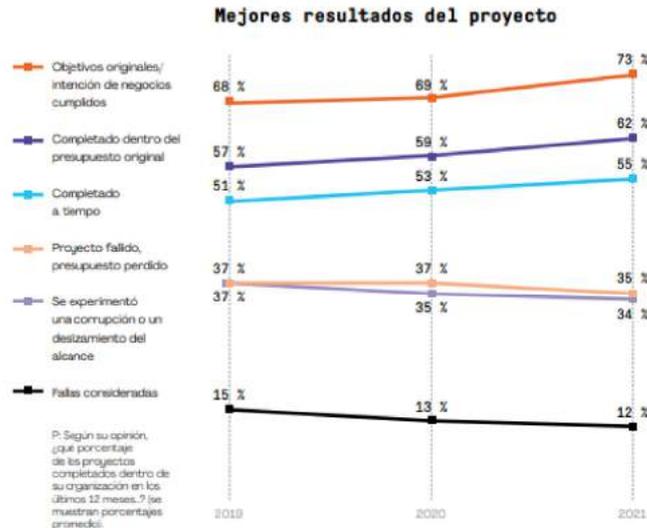


Figura 1: Informe PMI 2021 Pulse of the Profession - Mejores resultados del proyecto
Fuente: PMI (2021).

identificación, análisis, planificación e implementación de respuestas y el seguimiento de riesgos en un proyecto. Gracias a esta disposición, la ejecución de los procesos de gestión de riesgos durante todo el ciclo de vida del proyecto está garantizada.

Como la intención era tomar como base las prácticas más difundidas y mejor aceptadas para evaluar los riesgos de un proyecto, se adoptó como referencia el PMBOK® (Project Management Body of Knowledge), considerado mundialmente como la principal y más respetada guía de buenas prácticas de gestión de proyectos, cuya publicación es frecuentemente revisada por el PMI, *Project Management Institute*.

Manejar herramientas y lenguajes de programación es importante para transformar fuentes de datos en soluciones, pero no es exclusividad de profesionales de datos. Grandes profesionales de análisis y gerentes en general objetivan atender la demanda de conocimiento técnico en la búsqueda de generación de visualización de la información en gráficos e informes capaces de facilitar el entendimiento y el compartimiento de dichas informaciones.

Esto convierte el lenguaje R en una herramienta importante como base para el desarrollo de soluciones de negocios y procesos de toma de decisiones. Además de todos sus propósitos, R permite que los requerimientos sean moldeados pensando en la demanda y llama la atención por sus informes, gráficos y tablas de calidad. Además de ser gratuito y de código abierto, su capacidad de realizar numerosos procesos hace que su comunidad de desarrolladores crezca y posibilite la creación de nuevas funcionalidades en diferentes áreas. En lo que se refiere a la gestión de riesgos en proyectos, hay escasas herramientas, siendo esta la principal motivación para este trabajo.

Dependiendo de la complejidad del proyecto, es necesaria la utilización de algunos métodos y técnicas costosos para su proceso de gestión de riesgo. En el mercado se encuentran diversos *softwares* sobre la temática y, de este modo, serán evaluados aquellos basados en la simulación de Monte Carlo, verificar sus funcionalidades e implementarlas en R, que en este trabajo serán enfocadas para proyectos estocásticos con duraciones no deterministas.

La estructura general del trabajo será la siguiente:

- Capítulo 1. La gestión de riesgos: Este capítulo tiene como objetivo presentar conceptos clave como riesgos e incertidumbre, así como las etapas de la gestión de riesgos, sus herramientas y métodos.
- Capítulo 2. Los *softwares*: Durante este capítulo se presentarán algunos *softwares* para la gestión

de riesgos que utilizan simulación Monte Carlo, sus funcionalidades, así como sus ventajas e inconvenientes. Además, se presentará lo que hay en R sobre la temática.

- Capítulo 3. Aportación: Una vez conocidas las funcionalidades contenidas en los *softwares*, este capítulo estará destinado a la implementación de dichas funcionalidades en R, con ejemplos.
- Capítulo 4. Conclusiones y trabajo futuro: En este apartado se presentarán las conclusiones y futuras implementaciones.

Capítulo 1

Marco Teórico

1.1. Incertidumbre y riesgos en proyectos

El propósito de la gestión es establecer y preservar la estabilidad en la organización, con el objetivo de dominar la incertidumbre. Esto se logra a través de objetivos, procesos estandarizados y control, que también se aplican en la gestión de proyectos. Si bien el concepto de planificación y estandarización se basa en experiencias previas, enfrenta desafíos a la hora de abordar la incertidumbre en los proyectos (Böhle et al., 2016).

Eso se debe a que los proyectos tienen un inicio y un final definidos, y requieren una planificación y organización anticipada de actividades que se llevarán a cabo en momentos posteriores. Debido a la imposibilidad de predecir el futuro con total certeza, todos los proyectos están sujetos a incertidumbre, lo que implica riesgos asociados (Edwards et al., 2013).

De acuerdo con la definición del Project Management Institute (2017), un riesgo es un evento o condición incierta que, si se produce, tiene un efecto positivo o negativo en uno o más de los objetivos de un proyecto. Los riesgos negativos se denominan amenazas, y los riesgos positivos se denominan oportunidades.

Según Salles Jr et al. (2010), esta definición contiene implícitamente tres componentes: un evento que está asociado a la causa raíz del riesgo, es decir, su fuente generadora. Para esto, se debe identificar el origen del riesgo, así como su efecto, es decir, sus consecuencias; una probabilidad asociada a la ocurrencia del riesgo identificado; y un impacto que debe ser traducido en valores para permitir la comparación entre diferentes riesgos.

Para Alleman et al. (2018), la causa se estudia mediante la incertidumbre. El evento se ajusta con el riesgo y las consecuencias se asocian a las amenazas y oportunidades, que al ser reducidas o eliminadas, evitarán la ocurrencia, no ocurrencia o recurrencia de la causa del riesgo. Es posible la realización de un estudio de la probabilidad de ocurrencia o no ocurrencia de los eventos, ya que son definidos mediante una función de distribución de probabilidad. Para Zarikas et al. (2015), la búsqueda de la opción correcta a la hora de determinar dicha función es el objetivo de la gestión de riesgos.

Pelz et al. (2021) afirman que, antes de dominar la incertidumbre, se debe identificarla. Para ello, se apunta a la definición de los tipos de incertidumbre individuales. La incertidumbre en los sistemas técnicos se puede clasificar en diferentes tipos. Una posible clasificación se realiza en relación con el conocimiento sobre la fuente de la incertidumbre. Se distingue entre el efecto y la cuantificación de la incertidumbre. El clasificador captura el efecto de la incertidumbre en el sistema en su núcleo y distingue entre incertidumbre estocástica, incertidumbre e ignorancia. El clasificador se puede apreciar en la imagen de abajo.

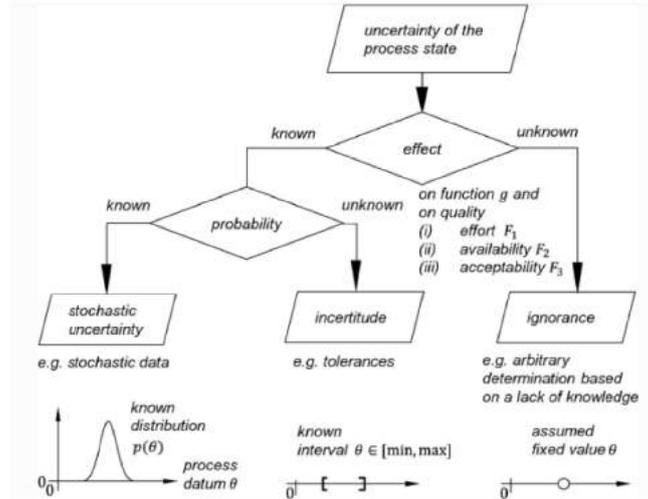


Figura 1.1: Clasificador que usa efecto y probabilidad para separar en incertidumbre estocástica, incertidumbre e ignorancia

Fuente: Pelz et al.(2021)

La incertidumbre estocástica se refiere a las incertidumbres que se basan en la probabilidad y que se pueden cuantificar. Por el contrario, la incertidumbre o ignorancia se refiere a las incertidumbres donde la fuente es desconocida o no se puede cuantificar. La decisión inicial es determinar si el efecto de una propiedad incierta del proceso en el proceso o en la función de la estructura es conocido o desconocido. Esto conlleva decidir si el efecto sobre el funcionamiento y la calidad del sistema se conoce o no.

En caso de que el efecto sea desconocido, se hace referencia a la ignorancia. Si, por el contrario, el efecto es conocido, entonces se habla de probabilidad. La cuestión subsiguiente es dilucidar si la probabilidad del efecto es conocida o desconocida. Si la probabilidad del efecto está solamente parcialmente cuantificada, se emplea el término incertitude. Si la probabilidad del efecto se encuentra suficientemente cuantificada, entonces se utiliza el concepto de incertidumbre estocástica.

La categoría de incertidumbre estocástica implica que se dispone del conocimiento de una función de densidad de probabilidad del estado del proceso. En tal caso, es factible describir, cuantificar y evaluar la incertidumbre. La incertitude se domina mediante la medición de muestras seleccionadas sistemáticamente o por la experiencia manifestada en clases de tolerancia. La incertidumbre estocástica y la incertitude conducen a un diseño de sistema no determinista.

Heßler M (2021) afirma que, si bien la gestión de proyectos tuvo sus orígenes en el ámbito de los grandes proyectos tecnológicos, como campo científico, elabora modelos bastante amplios y abstractos que no se enfocan en las particularidades específicas de diversas disciplinas tecnológicas. El énfasis pasó de la incertidumbre técnica a los elementos de riesgo, englobando factores técnicos, sociales y económicos. Por consiguiente, la incertidumbre estocástica se ha denominado riesgo en el contexto de la gestión de proyectos, ya que el riesgo abarca acontecimientos futuros posibles, pero impredecibles, que se conocen en principio y cuya probabilidad de ocurrencia puede calcularse.

El término técnico 'incertitude' no se utiliza en los debates y modelos de gestión de proyectos. Mientras que en ingeniería se distingue entre ignorancia e incertitude, en el contexto de la gestión de proyectos el término 'incertidumbre' está menos diferenciado y suele limitarse a la dicotomía entre riesgo e incertidumbre (en el sentido de ignorancia).

1.2. La gestión de riesgos en proyectos

El éxito de un proyecto está intrínsecamente ligado a una gestión eficaz que garantice el cumplimiento de sus objetivos y requisitos establecidos. Una manera clásica de representar los criterios de

éxito en un proyecto es a través del triángulo de hierro, también conocido como triple restricción, popularizado por Kerzner (2013). Este triángulo destaca tres elementos fundamentales: el alcance, el tiempo y el costo. El alcance define el trabajo necesario y las metas a alcanzar en el proyecto, especificando los entregables y los requisitos. El tiempo se refiere al cronograma del proyecto, incluyendo las fechas de inicio y fin, así como los hitos importantes a lo largo del proyecto. El costo representa el presupuesto asignado al proyecto y los recursos financieros necesarios para completarlo.

Estos tres componentes están interrelacionados de manera que cualquier cambio en uno de ellos afecta a los otros dos. Si se decide aumentar el alcance del proyecto añadiendo más tareas o características, por ejemplo, esto probablemente requerirá más tiempo y aumentará los costos. Similarmente, si se necesita acelerar el proyecto para cumplir una fecha límite más temprana, esto puede incrementar los costos y posiblemente limitar el alcance.



Figura 1.2: El triángulo de hierro del proyecto
Fuente: Kerzner (2013).

La gestión de riesgos juega un papel fundamental en este contexto, ya que se encarga de anticipar y abordar las incertidumbres que pueden impactar estos tres elementos clave del proyecto. Para esto, es esencial seguir enfoques y prácticas estandarizadas que aseguren una gestión eficaz de los riesgos.

El PMBOK (Project Management Body of Knowledge) es una guía publicada por el Project Management Institute (PMI) que establece estándares, mejores prácticas y terminología para la gestión de proyectos. Reconocida globalmente, ofrece una descripción detallada de los procesos, incluyendo entradas, herramientas, técnicas y salidas. Para la gestión de los riesgos del proyecto, el PMBOK incluye una serie de procesos esenciales que abarcan: la planificación, la identificación, el análisis cualitativo y cuantitativo, la planificación e implementación de las respuestas adecuadas para cada riesgo identificado, así como su monitoreo.

Aunque el PMBOK no se limita únicamente a la gestión de riesgos en el contexto del triángulo de hierro, abordando también aspectos como la calidad, los recursos humanos, las comunicaciones, las adquisiciones y la gestión de interesados, para los fines de este trabajo se considera adecuado centrarse solo en las tres restricciones.

1.2.1. Planificación e identificación de riesgos

La planificación de riesgos define cómo gestionar los riesgos del proyecto, estableciendo el enfoque, estrategia, metodologías, roles, presupuesto y cronograma. Es esencial delinear claramente las tareas y actividades, identificar los riesgos asociados, y prever reservas para contingencias.

La identificación de riesgos implica reconocer los riesgos relacionados con cambios en los requisitos y entregables del proyecto, influencias en fechas y hitos importantes, y posibles impactos en el presupuesto debido a costos imprevistos o fluctuaciones en precios.

1.2.2. Análisis de riesgos cualitativo

El análisis cualitativo de riesgos clasifica y prioriza los riesgos identificados según su probabilidad e impacto en el proyecto. Este proceso permite enfocar la gestión en los riesgos más significativos para asegurar el cumplimiento de los objetivos del proyecto. Se evalúa cómo los riesgos pueden afectar los entregables, el cronograma y el presupuesto, permitiendo tomar medidas preventivas y ajustar los planes según sea necesario. Para ello, se utilizan matrices de probabilidad e impacto que visualizan los riesgos críticos.

1.2.3. Análisis de riesgos cuantitativo

En proyectos donde las variables y eventos aleatorios influyen en los resultados, es crucial el análisis cuantitativo de riesgos. Este tipo de análisis expresa los riesgos en términos de datos medibles, permitiendo una mejor previsión y planificación para mitigar su impacto. Entre los enfoques utilizados se encuentran los procesos estocásticos y técnicas de simulación, proporcionando una comprensión más detallada en los siguientes apartados.

Para Vose (2008), el análisis de riesgos de un proyecto suele consistir en evaluar los riesgos de cronograma y costos, aunque a veces se incluyen otros aspectos como la calidad del producto final. En el cronograma, se cuantifican los posibles retrasos y su impacto en la ejecución del proyecto, analizando tareas e interrelaciones para identificar riesgos y determinar la ruta crítica. En cuanto a los costos, se cuantifican las implicaciones económicas de los riesgos y se preparan ajustes presupuestarios, considerando incertidumbres y oportunidades para determinar la incertidumbre total en el costo del proyecto.

Es importante considerar que los elementos de costo y cronograma suelen estar correlacionados. La consideración conjunta de estos factores, utilizando enfoques estocásticos y técnicas de simulación, vincula los costos y las duraciones en un modelo integrado, logrando una visión más integral del proyecto. A continuación, se explican algunas técnicas principales:

1.2.3.1. Técnicas cuantitativas

El análisis cuantitativo de riesgos emplea varias técnicas y herramientas para modelar numéricamente el impacto combinado de los riesgos identificados sobre los objetivos del proyecto. Algunas de las principales técnicas y herramientas utilizadas para los efectos de este proyecto son:

Representación de la incertidumbre:

Para representar la incertidumbre en cronogramas y costos, se utilizan distribuciones de probabilidad que reflejan la variabilidad y la incertidumbre asociadas con cada actividad del proyecto. En la gestión de proyectos, las distribuciones más comunes utilizadas para modelar la incertidumbre son:

Análisis de datos

Se utilizan diversas técnicas para evaluar numéricamente el impacto de los riesgos identificados en los objetivos del proyecto. A continuación, se describen las principales técnicas de análisis de datos para efectos de este proyecto.

Simulación Típicamente se realiza una simulación computarizada de Monte Carlo del modelo de riesgos, que es una herramienta estadístico-computacional para modelar, cuantificar y gestionar estas incertidumbres de forma analítica y probabilística. Esta metodología permite modelar, cuantificar y gestionar la incertidumbre de manera analítica y probabilística, proporcionando una evaluación detallada del impacto de los riesgos sobre los objetivos del proyecto. Según Vose (2008), la simulación de Monte Carlo es un método no determinístico que se basa en la generación de un gran número de escenarios aleatorios para representar todas las posibles configuraciones de los parámetros del modelo.

Distribución	Descripción	Fórmula	Parámetros
Distribución Normal	Utilizada cuando los valores se distribuyen simétricamente alrededor de la media. Adecuada para modelar tiempos y costos con una variabilidad moderada.	$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}$	μ : media, σ : desviación estándar
Distribución Triangular	Útil cuando se conocen los valores mínimo (a), máximo (b) y más probable (c), pero los datos son escasos.	$f(x) = \begin{cases} \frac{2(x-a)}{(b-a)(c-a)}, & a \leq x < c \\ \frac{2(b-x)}{(b-a)(b-c)}, & c \leq x \leq b \end{cases}$	a: mínimo, b: máximo, c: más probable
Distribución Beta	Adecuada para modelar tiempos y probabilidades, con valores entre 0 y 1 y gran flexibilidad en su forma. La forma de la distribución Beta está determinada por los parámetros α y β . Esta distribución puede adoptar diferentes formas, desde uniformes hasta sesgadas, dependiendo de los valores de α y β .	$f(x) = \frac{x^{\alpha-1}(1-x)^{\beta-1}}{B(\alpha, \beta)}$ donde $B(\alpha, \beta)$ es la función Beta. $B(\alpha, \beta) = \int_0^1 t^{\alpha-1}(1-t)^{\beta-1} dt$	α, β : parámetros de forma
Distribución Log-normal	Utilizada cuando los valores no pueden ser negativos y están sesgados a la derecha, como en tiempos de actividad y costos.	$f(x) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}}$	μ : media logarítmica, σ : desviación estándar logarítmica

Cuadro 1.1: Distribuciones de probabilidad utilizadas en el análisis cuantitativo de riesgos

Inicialmente, se establece un modelo matemático que describe el proyecto, incorporando todas las variables de entrada y sus interrelaciones. Este modelo sirve como base para las simulaciones y debe reflejar fielmente la realidad del proyecto. A cada variable de entrada se le asigna una distribución de probabilidad adecuada.

Posteriormente, se realizan numerosas simulaciones del modelo del proyecto. En cada iteración, se generan valores aleatorios para las variables de entrada de acuerdo con sus distribuciones de probabilidad asignadas. Esto permite explorar un amplio espectro de escenarios posibles (Savage, 2012).

Matemáticamente, la simulación de Monte Carlo se puede representar mediante la siguiente expresión:

$$X = \sum_{i=1}^n \frac{1}{n} f(x_i) \quad (1.1)$$

donde X representa la estimación del valor esperado de la función $f(x)$, x_i son valores aleatorios generados según la distribución de probabilidad de la variable de entrada, y n es el número de simulaciones realizadas.

Para Vose (2008), en este enfoque, tanto los costos como las duraciones de las actividades del proyecto serían tratados como variables aleatorias, descritas por distribuciones de probabilidad que capturan la incertidumbre inherente a esos parámetros. Las distribuciones de costos y duraciones pueden entonces correlacionarse dentro del modelo, de forma que una muestra aleatoria extraída de la distribución de duración esté vinculada a la respectiva muestra de la distribución de costos a través del coeficiente de correlación especificado.

El modelo de simulación de Monte Carlo recorrería miles o millones de iteraciones, muestreando valores de costo y duración a partir de las distribuciones correlacionadas, propagando esos valores a través de la red de actividades del proyecto siguiendo la lógica de la estructura analítica de riesgo especificada. Como resultado, se obtendrían distribuciones de probabilidad para las duraciones y costos totales del proyecto, que reflejarían no solo las incertidumbres individuales, sino también la dependencia entre estas dos métricas críticas.

Matemáticamente, la simulación de Monte Carlo se puede expresar de la siguiente manera:

$$X = \sum_{i=1}^n \frac{1}{n} f(x_i) \quad (1.2)$$

donde X representa la estimación del valor esperado de la función $f(x)$, x_i son valores aleatorios generados según la distribución de probabilidad de la variable de entrada, y n es el número de simulaciones realizadas.

Análisis de sensibilidad: El análisis de sensibilidad es una técnica que evalúa el impacto de cada variable de entrada incierta sobre las métricas de salida en un modelo. Generalmente se aplica junto con la Simulación de Monte Carlo para evaluar la distribución de resultados bajo diversas combinaciones de variables de entrada. Este enfoque maneja modelos con múltiples variables y distribuciones de probabilidad complejas (Helton y Davis, 2003).

Según Pannell (1997), el análisis de sensibilidad es esencial para entender cómo las variaciones en las variables de entrada afectan las métricas de salida de un modelo, permitiendo identificar los parámetros más críticos y guiar esfuerzos de mitigación. En la gestión de proyectos, ayuda a evaluar la robustez de las estimaciones de costos y cronogramas frente a la variabilidad de los parámetros clave (Hamby, 1994).

El análisis de sensibilidad proporciona datos sobre cómo cada variable afecta el resultado, y el diagrama de tornado organiza esta información de manera visualmente accesible, mostrando los coeficientes de correlación ordenados de mayor a menor impacto. En un diagrama de tornado, cada barra horizontal representa una variable de entrada y su rango de impacto en el resultado del proyecto. Las barras más largas indican variables con mayor influencia.

El cálculo de la variación porcentual se realiza utilizando la fórmula:

$$\text{Variación Porcentual} = \frac{\Delta Y}{Y} \times 100 \quad (1.3)$$

donde ΔY es el cambio en el valor de la variable de salida Y , y Y es el valor inicial de la variable de salida.

El índice de sensibilidad (SI) se calcula como:

$$SI = \frac{\Delta Y/Y}{\Delta X/X} \quad (1.4)$$

donde $\Delta Y/Y$ es la variación relativa en la salida, y $\Delta X/X$ es la variación relativa en la entrada.

El coeficiente de correlación entre dos variables X e Y se calcula utilizando la fórmula:

$$\rho_{XY} = \frac{\text{Cov}(X, Y)}{\sigma_X \sigma_Y} \quad (1.5)$$

donde ρ_{XY} es el coeficiente de correlación, $\text{Cov}(X, Y)$ es la covarianza entre X e Y , y σ_X y σ_Y son las desviaciones estándar de X e Y , respectivamente.

1.2.3.2. Resultados de las simulaciones

Los resultados de las simulaciones se analizan para determinar la distribución de los posibles resultados del proyecto. Este análisis permite identificar los riesgos más significativos y evaluar la probabilidad de alcanzar los objetivos del proyecto.

Distribuciones de resultados simulados

Las distribuciones de resultados simulados muestran la variabilidad y las probabilidades asociadas con los costos y las duraciones del proyecto. Estas distribuciones se generan a partir de las múltiples iteraciones de la simulación, proporcionando una visión probabilística de los posibles resultados del proyecto. Las salidas de la simulación incluyen las distribuciones de las duraciones y costos del proyecto. Estas distribuciones permiten entender la probabilidad de distintos escenarios y preparar planes de contingencia adecuados.

Curvas S

Las curvas S son representaciones gráficas que muestran la acumulación de costos o tiempos probables a lo largo del proyecto. Estas curvas permiten visualizar la probabilidad acumulada de exceder ciertos niveles de costo o tiempo, proporcionando una herramienta crucial para la gestión de proyectos y la evaluación de riesgos.

Las curvas S se basan en la función de distribución acumulada (CDF), que muestra la probabilidad de que una variable aleatoria sea menor o igual a un valor específico. Esto es fundamental para entender la probabilidad acumulada de completar el proyecto en un tiempo determinado o dentro de un presupuesto específico. La función de distribución acumulada se define como:

$$F(x) = P(X \leq x) \quad (1.6)$$

donde $F(x)$ es la función de distribución acumulada, P es la probabilidad, y X es la variable aleatoria.

Las curvas S tienen dos ejes principales:

- **Eje X (Horizontal):** Representa el tiempo o el costo acumulado.
- **Eje Y (Vertical):** Representa la probabilidad acumulada, variando de 0 a 100%.

El cálculo de percentiles es útil para entender la probabilidad acumulada de ciertos resultados. Los percentiles dividen el conjunto de datos en cien partes iguales:

$$P_k = x_{\left(\frac{k}{100}(n+1)\right)} \quad (1.7)$$

donde P_k es el k -ésimo percentil, x son los valores ordenados de los resultados simulados, y n es el número total de iteraciones de la simulación.

1.2.4. Planificar respuestas a los riesgos

La fase de planificación de respuestas a los riesgos desarrolla estrategias específicas para abordar los riesgos identificados, ya sean amenazas u oportunidades. Además, durante este proceso, se actualizan las estimaciones de costos y el cronograma del proyecto para reflejar las estrategias de respuesta a los riesgos seleccionadas. A continuación, se explica cómo se integran estas restricciones en la planificación de respuestas a los riesgos.

1.2.4.1. Estrategias de respuesta para riesgos negativos (amenazas)

- Evitar: Evitar un riesgo implica modificar el plan del proyecto para eliminar por completo la amenaza que representa dicho riesgo.
- Transferir: Esta estrategia implica trasladar el impacto del riesgo a un tercero, como a través de un seguro o un contrato con penalidades.
- Mitigar: Las estrategias de mitigación tienen como objetivo reducir la probabilidad y/o el impacto de un riesgo. Añadir márgenes de tiempo adicionales en el cronograma y realizar análisis de caminos críticos para detectar y minimizar cuellos de botella. Asignación de reservas de contingencia para cubrir costos adicionales que pudieran surgir debido a riesgos identificados. Las estrategias de mitigación, como la asignación de recursos adicionales o la incorporación de actividades en el cronograma, suelen implicar un aumento en los costos y una extensión del plazo del proyecto. Sin embargo, estas acciones pueden ser necesarias para reducir la probabilidad o el impacto de los riesgos identificados.
- Aceptar: La aceptación significa reconocer que un riesgo existe y decidir no tomar medidas proactivas para cambiar su probabilidad o impacto. Una estrategia clave es la aceptación activa, que implica el establecimiento de reservas de contingencia tanto para costos como para el cronograma.

1.2.4.2. Estrategias para riesgos positivos (oportunidades)

- Explotar: Ampliar el alcance para maximizar los beneficios de la oportunidad.
- Compartir: Colaborar con socios estratégicos para expandir el alcance y capturar la oportunidad. Crear asociaciones que permitan acelerar el cronograma aprovechando capacidades externas. Compartir costos y beneficios con socios para reducir riesgos financieros.
- Mejorar: Optimizar procesos y recursos para mejorar la probabilidad de éxito de la oportunidad. Reducir duraciones de tareas con métodos mejorados o tecnologías avanzadas. Reasignar recursos financieros para mejorar áreas estratégicamente importantes.
- Aceptar: Reconocer la oportunidad sin realizar cambios en el alcance, pero estar preparados para aprovecharla.

1.2.5. Implementar respuestas a los riesgos

La implementación de las respuestas a los riesgos implica ejecutar las acciones planificadas para mitigar, transferir, aceptar o evitar riesgos de manera efectiva. En cuanto al tiempo, se implementan estrategias para gestionar retrasos y anticipar cambios en el cronograma. Respecto a los recursos, se utilizan reservas para mitigar impactos y gestionar ajustes necesarios.

Entre las acciones más destacadas se encuentran el *Schedule Crashing*, que reduce la duración de las actividades críticas mediante la asignación de recursos adicionales; el *Minimum Cost Expediting*, que busca el equilibrio óptimo entre el esfuerzo adicional y la reducción del tiempo del proyecto; el *Fast Tracking*, que permite ejecutar tareas en paralelo en lugar de en secuencia; y el nivelamiento

de recursos, que ajusta el cronograma para equilibrar la demanda y disponibilidad de recursos sin sobrecargar equipos.

En cuanto a la mitigación de riesgos, se destaca la reserva de contingencia, diseñada para proporcionar un colchón temporal frente a riesgos identificados y cuantificados. Su implementación permite gestionar impactos adversos sin afectar significativamente el cronograma o los recursos originales del proyecto.

Una metodología efectiva para calcular la reserva de cronograma es mediante la simulación estocástica basada en percentiles. Este enfoque utiliza la técnica de Monte Carlo para generar una distribución de posibles duraciones del proyecto, considerando la variabilidad y la incertidumbre de las actividades individuales. La reserva de cronograma se determina entonces como la diferencia entre dos percentiles específicos de esta distribución, reflejando así un nivel deseado de confianza en la planificación del proyecto.

El cálculo de la reserva de cronograma (R_C) se puede expresar de la siguiente manera:

$$R_C = P_X - P_Y \quad (1.8)$$

Donde:

- R_C es la reserva de cronograma.
- P_X es el percentil superior de la distribución de duraciones del proyecto, indicando que el X % de las simulaciones sugieren que la duración del proyecto no excederá este valor.
- P_Y es el percentil base de la distribución de duraciones del proyecto, que puede ser la mediana u otro percentil seleccionado según la política del proyecto.

1.2.6. Monitorear riesgos

El monitoreo de riesgos implica realizar un seguimiento constante de los riesgos identificados previamente, así como identificar y analizar nuevos riesgos que puedan surgir durante la ejecución del proyecto. Este proceso permite asegurar que el nivel de exposición al riesgo general del proyecto se mantiene dentro de los umbrales aceptables.

1.2.6.1. El *Earned Value Management*

Para Hillson (2004), la gestión del valor ganado (EVM) y la gestión de riesgos pueden aplicarse de manera integrada, ya que ambas fomentan la adopción de medidas en respuesta a los resultados del análisis de cronograma, alcance y costo. El método se basa en la comparación del estado actual del proyecto con los datos planificados a través de la medición frecuente del desempeño en relación a una línea base de costos construida de acuerdo con los costos de cada tarea. Mientras la planificación de proyectos analiza los siguientes pasos inmediatos, la gestión de riesgos mira hacia un futuro incierto y, en la opinión de Hillson (2004), esta es una razón aún más fuerte para una sinergia entre ambas. Esto se debe a que la gestión de riesgos se debilita por la ausencia de una conciencia real del pasado y el EVM, al suponer que se puede predecir el desempeño futuro a partir del desempeño pasado.

El EVM se calcula utilizando tres variables (magnitudes), de modo que las demás se calcularán a partir de estas.

Magnitudes:

Las tres dimensiones clave para cada paquete de trabajo son:

- *Planned Value (PV)*: Representa el estado de desarrollo en el que se supone que se posicionaría el proyecto en el momento del control. También conocido como presupuesto planificado, es una estimación de la cantidad de trabajo que debería haberse realizado en un momento determinado. También es conocido como *Budgeted Cost for Work Scheduled (BCWS)*.

- *Actual Cost (AC)*: Importe real gastado hasta la fecha en el proyecto para realizar el trabajo planificado. Representa los costos reales incurridos hasta un punto dado en el tiempo. Burke (2013) afirma que dichas variables deben presentarse en la misma unidad de medida para evitar errores en el análisis de datos. También es conocido como *Actual Cost of Work Performed (ACWP)*.
- *Earned Value (EV)*: El Valor Ganado es la cantidad inicialmente prevista que debería haber sido gastada teniendo en cuenta el trabajo realmente completado hasta el momento de control, medido con respecto al presupuesto planificado. También es conocido como *Budgeted Cost for Work Performed (BCWP)*.

Variaciones:

A continuación se muestran los indicadores de desviaciones en tiempo y costo.

- *Schedule Variance (SV)*: Medida del rendimiento del cronograma del proyecto. Para valores negativos, el proyecto está atrasado; para valores positivos, está adelantado y tiende a cero al final del proyecto, ya que todas las actividades deberían haberse completado según lo previsto. Utilizada en conjunto con el método de la ruta crítica, es posible obtener más información acerca de las posibles causas de los fenómenos observados.
- *Cost Variance (CV)*: Medida del rendimiento del costo del proyecto. Para valores negativos, los costos del proyecto superan los costos planificados; para valores positivos, los costos son inferiores a lo previsto. El CV es crítico porque relaciona el rendimiento físico del proyecto con los gastos realmente incurridos (Project Management Institute, 2017).

Métrica	Fórmula	Valor	Descripción
CV	EV-AC	Positivo	Costes por debajo de lo planeado
		Negativo	Costes por encima de lo planeado
SV	EV-PV	Positivo	Tiempo empleado por debajo de lo planeado
		Negativo	Tiempo invertido por encima de lo planeado

Cuadro 1.2: Variaciones y significados

De acuerdo con Burke (2013), al convertir los valores de SV y CV en porcentajes, se puede eliminar la distorsión causada por el tamaño de las actividades. Burke también afirma que el análisis de EV no debe hacerse de forma aislada, ya que una actividad con un valor SV más alto puede no causar tanto impacto como otra que presenta un valor menor, pero que es parte de la ruta crítica y, por lo tanto, requiere una reprogramación.

Indicadores de eficiencia:

Los indicadores de variación SV y CV se pueden convertir en indicadores de eficiencia que reflejan el desempeño de costo y tiempo. Según Acebes et al. (2014), para evaluar proyectos con diferentes dimensiones, se deben calcular los indicadores de eficiencia de ambos proyectos. Cuando se evalúa la eficiencia en diferentes períodos para un mismo proyecto, también es importante calcular estos indicadores.

- *Cost Performance Index* (CPI): Medida de la eficiencia en el gasto del proyecto en relación con lo planeado, representando el uso eficiente de los recursos. Se considera la métrica más crítica del EVM según el Project Management Institute (2017).
- *Schedule Performance Index* (SPI): Medida de la eficiencia del cronograma del proyecto, determinando la distancia del proyecto respecto a la realización de las actividades planificadas.

Métrica	Fórmula	Valor	Descripción
CPI	EV/AC	>1	Costes por debajo de lo planeado
		<1	Costes por encima de lo planeado
SPI	EV/PV	>1	Tiempo empleado por debajo de lo planeado
		<1	Tiempo invertido por encima de lo planeado

Cuadro 1.3: Indicadores de eficiencia y significados

Pronósticos y estimaciones:

El EVM no evalúa la situación del proyecto en términos de presupuesto y tiempo solo en una fecha determinada para su control, sino que también permite la realización de una previsión de la estimación de su conclusión. La referencia es el valor total para la conclusión del proyecto, *Budget at Completion* (BAC), que se definió en la fase de planificación. Al hacer un pronóstico con respecto a la cantidad y tiempo requerido para completar el proyecto, también se realizan proyecciones para nuevos escenarios en caso de adopción de medidas correctivas. Con esto, se utilizan los conceptos:

- *Estimate At Completion* (EAC): Presupuesto actualizado del proyecto, ya que tiene en cuenta el rendimiento real en el momento del control, más el importe que se espera gastar en actividades que aún no se han completado. Es posible adoptar tres perspectivas para medir tiempo y costo en los nuevos pronósticos: optimista, probable y pesimista; su elección dependerá del tomador de decisiones.
 - EAC optimista: Si se supone que las desviaciones de costos verificadas hasta el momento del control pueden ser desestimadas y no volverán a ocurrir en el futuro.
 - EAC probable: Considera que las desviaciones de costos hasta el momento del control continuarán con el mismo patrón de variación en el futuro y asume que no se implementarán medidas correctivas en el proyecto. Se supone que las actividades se realizarán de acuerdo con el CPI registrado en el momento del control.
 - EAC pesimista: La estimación basada en los índices CPI y SPI tiende a mostrar valores más altos.
- *Estimate To Complete* (ETC): Estima la cantidad que todavía hay que gastar para completar el trabajo restante.
- *To-Complete Performance Index* (TCPI): Determina la productividad necesaria para alcanzar el valor estipulado al finalizar el proyecto. Corresponde al nivel de eficiencia necesario para lograr el BAC o EAC.

Métrica	Fórmula	Valor	Descripción
EAC	BAC-CV		Optimista
EAC	BAC/CPI		Probable
EAC	$AC + [(BAC - EV) / (CPI * SPI)]$		Pesimista
ETC	EAC-AC		
TCPI	$(BAC - EV) / (BAC - AC)$	>1	Disminución de actuación
(BAC)		<1	Aumento de actuación
TCPI	$(BAC - EV) / (EAC - AC)$	>1	Disminución de actuación
(EAC)		<1	Aumento de actuación

Cuadro 1.4: Estimaciones

- *Variance At Completion (VAC)*: Indica la desviación en relación al presupuesto inicial que se ha definido para el proyecto.

Una condición fundamental para poder aplicar la metodología es que la planificación de recursos esté vinculada al cronograma de actividades del proyecto. Para cumplir con esta condición, se crea la *Work Breakdown Structure (WBS)*, un proceso de dividir los entregables del proyecto en componentes más pequeños y manejables, que luego se unirá a las líneas base de costo y cronograma para formar la *Performance Measurement Baseline (PMB)*, que establece un criterio para distribuir en el tiempo el costo de cada una de las actividades.

1.2.7. Gestión de riesgos de cronograma

El análisis cuantitativo de riesgos del cronograma puede realizarse de manera aislada o integrada con los costos. Cuando se realiza de forma aislada, las duraciones de las actividades, expresadas como distribuciones de probabilidad, son las entradas principales para el modelo de simulación del cronograma. Este enfoque permite concentrarse en los impactos y la variabilidad de las fechas de entrega, facilitando decisiones específicas sobre contingencias y respuestas a riesgos de cronograma.

Este análisis evalúa cómo los riesgos y la incertidumbre afectan la duración total del proyecto. Sus salidas típicas incluyen distribuciones de probabilidad de la duración total, análisis de sensibilidad y diagramas de tornado para identificar los factores de riesgo más influyentes. Además, permite evaluar el impacto de las incertidumbres en las fechas clave, determinar las probabilidades de cumplir con las fechas planificadas, identificar los principales impulsores de riesgo y desarrollar planes de respuesta y reservas de contingencia. Finalmente, facilita el monitoreo y control activo de los riesgos del cronograma durante la ejecución del proyecto.

1.2.7.1. Etapa 1. Estimación de la duración de las actividades

En un proyecto estocástico, las duraciones de las actividades se estiman utilizando distribuciones de probabilidad para capturar la incertidumbre inherente. Esto permite reconocer la variabilidad natural de las duraciones y modelar los riesgos que pueden afectar la duración de las actividades. La técnica

PERT de tres puntos se utiliza para obtener duraciones optimistas, más probables y pesimistas. La fórmula para calcular la duración esperada (TE) es:

$$TE = \frac{O + 4M + P}{6} \quad (1.9)$$

donde:

- O es la duración optimista,
- M es la duración más probable,
- P es la duración pesimista.

Esta técnica permite integrar de manera cuantitativa las incertidumbres en las estimaciones de tiempo.

1.2.7.2. Etapa 2. Definir las relaciones de precedencia

Las relaciones de precedencia definen la secuenciación lógica entre las actividades del cronograma. Primero, se analiza el alcance y los requisitos de cada actividad para identificar dependencias obligatorias y técnicas. También se registran desfases de tiempo (anticipación y retraso) entre actividades relacionadas.

Las cuatro relaciones lógicas del Método de Diagramación por Precedencia (PDM) son:

- **Fin-Inicio (FS)**: La sucesora inicia solo después de que la predecesora haya terminado, con posibilidad de adelantar o retrasar el inicio.
- **Inicio-Inicio (SS)**: La sucesora inicia después de que la predecesora haya iniciado, con posibilidad de retraso entre los inicios.
- **Fin-Fin (FF)**: La sucesora termina después de que la predecesora haya terminado, con posibilidad de anticipación o retraso entre los términos.
- **Inicio-Fin (SF)**: La sucesora no puede terminar hasta que la predecesora haya iniciado, generalmente en situaciones específicas.

El mapeo de estas relaciones ayuda a definir la ruta crítica y la duración total del proyecto. La red de precedencia se construye representando actividades como nodos conectados por relaciones lógicas, asegurando la ausencia de ciclos o bucles.

1.2.7.3. Etapa 3. Cálculo de la ruta crítica

El Método de la Ruta Crítica (CPM) es una técnica para identificar la secuencia de actividades que determina la duración total mínima del proyecto. La ruta crítica es esencial porque cualquier retraso en una actividad crítica implica un retraso en la fecha de finalización del proyecto.

Primero, se construye la red de precedencia, que es una representación gráfica de todas las actividades del proyecto como nodos, conectados por flechas que representan las relaciones lógicas de precedencia (Fin-Inicio, Inicio-Inicio, Fin-Fin, Inicio-Fin).

A continuación, se realiza el cálculo de las fechas tempranas y tardías. El pase hacia adelante (Forward Pass) se utiliza para calcular el tiempo más temprano en el que cada actividad puede comenzar (ES) y terminar (EF). Se asigna $ES = 0$ a la(s) actividad(es) inicial(es) y se calculan sucesivamente las fechas tempranas para las demás actividades, de izquierda a derecha en la red, respetando las precedencias.

$$ES_i = \max(\{EF_{\text{predecesoras}}\}) \quad (1.10)$$

$$EF_i = ES_i + \text{Duración}_i \quad (1.11)$$

Luego, se realiza el pase hacia atrás (Backward Pass) para calcular las fechas más tardías en las que cada actividad puede comenzar (LS) y terminar (LF) sin retrasar la fecha de finalización del proyecto. Se asignan las fechas tardías finales a las actividades terminales y se calculan hacia atrás, de derecha a izquierda en la red.

$$LF_i = \text{mín}(\{LS_{\text{sucesoras}}\}) \quad (1.12)$$

$$LS_i = LF_i - \text{Duración}_i \quad (1.13)$$

Las holguras indican cuánto puede retrasarse una actividad sin afectar la fecha de término del proyecto. Se calculan como la diferencia entre las fechas tardías y tempranas de cada actividad.

$$\text{Float}_i = LS_i - ES_i = LF_i - EF_i \quad (1.14)$$

Las actividades con holgura total nula ($\text{Float} = 0$) componen la ruta crítica. Estas actividades no tienen flexibilidad de programación; cualquier retraso en una actividad crítica resultará en un retraso en la fecha de finalización del proyecto.

Identificar la ruta crítica es crucial para la gestión efectiva del cronograma del proyecto. Permite a los gestores de proyectos focalizarse en las actividades que realmente determinan la fecha de finalización del proyecto, permitiendo la asignación de recursos y la planificación de contingencias de manera más eficiente.

1.2.7.4. Etapa 4. Construir el modelo de simulación de cronograma

Para construir el modelo de simulación de cronograma, se integran las estimaciones de duraciones probabilísticas, la red de precedencias y el cálculo de la ruta crítica.

Primero, se incorporan las estimaciones de duraciones probabilísticas, obtenidas mediante distribuciones de probabilidad, para capturar la incertidumbre en las duraciones de las actividades. Luego, se utiliza la red de precedencias para asegurar que las dependencias entre actividades se respeten durante la simulación. Finalmente, se incluye el cálculo de la ruta crítica para identificar las actividades que determinan la duración mínima del proyecto y que no tienen flexibilidad de programación.

Este modelo permite evaluar el impacto de las incertidumbres en las duraciones de las actividades sobre la duración total del proyecto. Mediante la simulación de Monte Carlo, se generan numerosos escenarios de fechas de finalización del proyecto, construyendo así una distribución empírica de probabilidad para la duración total del proyecto. Esto proporciona una visión clara y cuantitativa del impacto de la incertidumbre en el cronograma, facilitando la planificación de contingencias y la toma de decisiones informadas.

Para el cálculo de las fechas tempranas y tardías, se utilizan las siguientes fórmulas:

Para la fecha de inicio más temprana (ES_i) de una actividad i :

$$ES_i = \text{máx}(\{EF_j\} \text{ para todas las actividades } j \text{ que preceden a } i) \quad (1.15)$$

Para la fecha de finalización más temprana (EF_i) de una actividad i :

$$EF_i = ES_i + D_i \quad (1.16)$$

Para la fecha de finalización más tardía (LF_i) de una actividad i :

$$LF_i = \text{mín}(\{LS_j\} \text{ para todas las actividades } j \text{ que suceden a } i) \quad (1.17)$$

Para la fecha de inicio más tardía (LS_i) de una actividad i :

$$LS_i = LF_i - D_i \quad (1.18)$$

Las holguras ($Float_i$) se calculan como:

$$Float_i = LS_i - ES_i = LF_i - EF_i \quad (1.19)$$

Las actividades con holgura total nula ($Float = 0$) componen la ruta crítica. Estas actividades no tienen flexibilidad de programación; cualquier retraso en una actividad crítica resultará en un retraso en la fecha de finalización del proyecto.

1.2.7.5. Etapa 5. Analizar e interpretar los resultados

Después de ejecutar la simulación, se obtiene una muestra representativa de la distribución de probabilidad de la duración total del proyecto. Esta distribución puede ser representada gráficamente por la función de densidad de probabilidad o por la función de distribución acumulada (curva S). Después de generar la distribución de probabilidad de la duración total del proyecto a través de la simulación, es posible obtener:

Medidas de tendencia central y dispersión Después de generar la distribución de probabilidad de la duración del proyecto mediante la simulación, es fundamental calcular estadísticas descriptivas como la media, mediana, moda y otros percentiles relevantes. Estas medidas proporcionan información sobre las duraciones más probables (tendencia central) y la variabilidad o dispersión de los valores en torno a la media (dispersión). Por otro lado, los percentiles inferiores y superiores delimitan intervalos de confianza para la duración. Estas métricas ayudan a comprender el comportamiento estocástico de la variable de interés.

Probabilidades de escenarios específicos La simulación de Monte Carlo aplicada al análisis de riesgos de cronograma permite cuantificar las probabilidades asociadas a diferentes escenarios de duración total del proyecto. Se construye la función de distribución acumulada empírica $F(t)$ de la duración total del proyecto a partir de los resultados de la simulación. Para determinar la probabilidad de que la duración total exceda un límite máximo tolerable T , se utiliza la propiedad fundamental de la CDF:

$$P(\text{duración total} > T) = 1 - F(T) \quad (1.20)$$

La curva S resultante muestra gráficamente esta probabilidad, facilitando la toma de decisiones informadas sobre la gestión de riesgos del cronograma.

1.2.7.6. Etapa 6. Gráfico de tornado e indicadores de sensibilidad del cronograma de proyectos

El análisis de sensibilidad en el contexto del cronograma de proyectos es una técnica analítica utilizada para determinar qué riesgos o fuentes de incertidumbre presentes en el modelo de análisis cuantitativo de riesgos del cronograma ejercen mayor influencia sobre la duración total del proyecto (Vanhoucke, 2015). Tras la ejecución de una simulación, es posible evaluar cómo las variaciones en los parámetros de entrada, como la duración de las actividades, afectan la distribución de probabilidad de la duración total del proyecto, que es la salida del proceso. Una de las técnicas más efectivas para realizar este análisis de sensibilidad es el uso de la media condicional.

Para construir el gráfico de tornado utilizando la técnica de la media condicional, es necesario calcular la media de la variable de salida para los valores más bajos y más altos de cada variable de entrada. Una vez ordenados los resultados, para cada variable de entrada x_i , se seleccionan los valores en los percentiles más bajos (por ejemplo, el 5%) y más altos (por ejemplo, el 95%). Estos subconjuntos se denotan como X_i^{low} y X_i^{high} . Matemáticamente, esto se expresa como:

$$X_i^{low} = \{x_i \mid x_i \leq P_5(x_i)\} \quad (1.21)$$

$$X_i^{high} = \{x_i \mid x_i \geq P_{95}(x_i)\} \quad (1.22)$$

donde $P_5(x_i)$ y $P_{95}(x_i)$ son el percentil 5 y el percentil 95 de x_i , respectivamente.

Con estos subconjuntos identificados, se procede a calcular las medias condicionales de la duración total del proyecto Y para los valores extremos de cada actividad. Las medias condicionales se calculan como:

$$\mu_{Y|X_i^{low}} = \frac{1}{|X_i^{low}|} \sum_{x_j \in X_i^{low}} y_j \quad (1.23)$$

$$\mu_{Y|X_i^{high}} = \frac{1}{|X_i^{high}|} \sum_{x_j \in X_i^{high}} y_j \quad (1.24)$$

donde $|X_i^{low}|$ y $|X_i^{high}|$ son el número de elementos en los conjuntos X_i^{low} y X_i^{high} , respectivamente.

Con las medias condicionales calculadas, se puede construir el gráfico de tornado. Este gráfico visualiza la variabilidad de la duración total del proyecto (variable de salida) en función de las duraciones de las actividades (variables de entrada). El eje X del gráfico de tornado representa la media condicional de la duración total del proyecto Y , con valores que van desde $\mu_{Y|X_i^{low}}$ hasta $\mu_{Y|X_i^{high}}$ para cada actividad i . Para cada actividad, se dibuja una barra horizontal que se extiende desde $\mu_{Y|X_i^{low}}$ hasta $\mu_{Y|X_i^{high}}$. La longitud de la barra, que es $L_i = \mu_{Y|X_i^{high}} - \mu_{Y|X_i^{low}}$, indica la sensibilidad de la duración total del proyecto a las variaciones en la duración de la actividad i .

Finalmente, las barras se ordenan de mayor a menor longitud para identificar visualmente las actividades más críticas. Las actividades con las barras más largas son aquellas que tienen un mayor impacto en la duración total del proyecto.

Indicadores de sensibilidad del cronograma de proyectos

Existen varios indicadores de sensibilidad que se utilizan para medir el impacto de las incertidumbres en las actividades del proyecto. Entre los más importantes se encuentran el Índice de Criticidad (CI), el Índice de Significancia (SI), el Índice de Sensibilidad del Cronograma (SSI) y el Índice de Crucialidad (CRI).

Índice de Criticidad (CI): Este indicador mide la probabilidad de que una actividad se encuentre en el camino crítico del proyecto. Es fundamental porque el camino crítico determina la duración mínima del proyecto, y cualquier actividad en este camino que experimente un retraso afectará directamente la fecha de finalización del proyecto (Vanhoucke, 2015). Para cada simulación, se determina el camino crítico basado en las duraciones simuladas de las actividades y se registra la duración total del proyecto para cada simulación. El CI se calcula contando cuántas veces una actividad está en el camino crítico a lo largo de las simulaciones y dividiendo por el número total de simulaciones.

El Índice de Criticidad se define matemáticamente como:

$$CI_i = \frac{1}{S} \sum_{n=1}^S \tau(t_{fi} = 0) \quad (1.25)$$

Donde:

- CI_i es el índice de criticidad para la actividad i .
- S es el número total de simulaciones.
- $\tau(x)$ es una función que retorna 1 si x es verdadero y 0 si es falso.
- t_{fi} es la holgura de la actividad i en la simulación n .

Los índices de criticidad se normalizan en una escala de 0% a 100%, facilitando la interpretación y la clasificación de los elementos más críticos.

Índice de crucialidad (CRI): El CRI mide la correlación entre la variación de la duración de una actividad y la duración total del proyecto. Este indicador puede calcularse utilizando diferentes métodos de correlación, como el coeficiente de Pearson, Spearman o Kendall, y es útil para evaluar la relación entre las duraciones de actividades específicas y la duración total del proyecto (Vanhoucke, 2015).

Entre las diversas formas de calcular el CRI, el Coeficiente de Correlación de Pearson es una de las más comunes y robustas, especialmente cuando se espera una relación lineal entre las variables. El Coeficiente de Correlación de Pearson se define matemáticamente como:

$$CRI_i = \text{Corr}\{\text{Duración de la Actividad}, \text{Duración del Proyecto}\}_i \quad (1.26)$$

donde $\text{Corr}\{x, y\}$ es la correlación entre x e y .

En el contexto del análisis de sensibilidad de proyectos, estas variables son la duración de una actividad específica y la duración total del proyecto. Un CRI_i positivo alto indica que, a medida que la duración de una actividad aumenta, también aumenta la duración total del proyecto, sugiriendo una fuerte relación directa. Un CRI_i negativo alto indica una relación inversa. Un valor cercano a cero indica que no hay una relación lineal significativa entre las dos duraciones.

Índice de sensibilidad del cronograma (SSI): Este índice combina el CI con la varianza de las duraciones de las actividades y del proyecto, proporcionando una medida que considera tanto la probabilidad como el impacto de las actividades en el cronograma del proyecto. El SSI es especialmente útil para priorizar actividades en función de su riesgo potencial y su impacto en el cronograma (Vanhoucke, 2015). Según el Project Management Institute (2017), la integración de análisis de riesgos en el cronograma es crucial para la planificación y el control efectivos del proyecto. El SSI ayuda a identificar las actividades que deben recibir más atención para mitigar los riesgos que puedan afectar la entrega del proyecto a tiempo.

El índice de sensibilidad del cronograma (SSI) se define como:

$$SSI_i = \left(\frac{\text{StDev}\{\text{Duración de la Actividad}\}}{\text{StDev}\{\text{Duración del Proyecto}\}} \right) \cdot CI_i \quad (1.27)$$

donde $\text{StDev}\{x\}$ es la desviación estándar de x .

Índice de significancia (SI): El SI mide el impacto relativo de una actividad específica en la duración total del proyecto. Refleja cómo las variaciones en la duración de una actividad pueden influir en el cronograma completo, proporcionando una visión detallada de la importancia de cada actividad (Williams, 1992).

El índice de significancia (SI) se define como:

$$SI_i = \mathbb{E} \left[\frac{\text{Duración de la Actividad}}{\text{Duración de la Actividad} + \text{Slack de la Actividad}} \cdot \frac{\text{Duración del Proyecto}}{\mathbb{E}(\text{Duración del Proyecto})} \right] \quad (1.28)$$

donde $\mathbb{E}\{x\}$ es el valor esperado de x .

El SI permite identificar actividades que, aunque no siempre estén en el camino crítico, tienen un gran impacto en la duración total del proyecto debido a su variabilidad y duración. Esto ayuda a los gestores de proyectos a enfocar recursos y esfuerzos en actividades que, aunque no sean críticas, afectan significativamente el cronograma.

1.2.7.7. Etapa 7. Desarrollar planes de mitigación

Los planes de mitigación y monitoreo del cronograma se centran en ajustes a la secuenciación de actividades, la adición de márgenes de tiempo, el refinamiento de las estimaciones de duración y el establecimiento de fechas de contingencia, con el fin de mitigar posibles retrasos identificados.

La reserva de contingencia del cronograma (*Schedule Contingency Reserve - SC*) es un margen adicional de tiempo incorporado al cronograma para acomodar riesgos e incertidumbres identificados por el análisis cuantitativo de riesgos. Actuando como un búfer, la SC se asigna en la ruta crítica, además de la duración planificada inicialmente, aumentando la probabilidad de finalización dentro del nuevo plazo extendido. Su cálculo requiere dos componentes principales: la duración en el percentil de confianza deseado y una medida central de tendencia de la distribución de duraciones simuladas. Esta medida central se usa para ajustar el valor de la reserva en función de la variabilidad observada en las simulaciones.

Para determinar la duración en el percentil deseado, primero se identifica el percentil P en la distribución de probabilidad de las duraciones totales obtenida a través de la simulación de Monte Carlo. En una distribución ordenada, el percentil P se calcula como:

$$P = \frac{n + 1}{N} \cdot 100\% \quad (1.29)$$

donde n es el número total de observaciones y N es la probabilidad acumulada deseada expresada como una fracción decimal.

Luego, todas las duraciones totales simuladas se ordenan de menor a mayor. El valor de la duración en el percentil deseado (*Duration at Percentile P* o $D(P)$), se identifica en esa muestra ordenada. Por ejemplo, si en 1000 simulaciones, el percentil 80 corresponde a la duración número 801 en la muestra ordenada. Finalmente, la reserva de contingencia del cronograma se calcula como:

$$SC = D(P) - M \quad (1.30)$$

donde $D(P)$ es la duración en el percentil deseado P y M es la medida central de tendencia M de la distribución simulada, la cual puede ser la media o la mediana. Esta reserva de contingencia se agrega como una actividad al final de la ruta crítica del cronograma.

1.2.7.8. Etapa 8. Monitoreo y control

Earned Duration Management (EDM)

El método *Earned Duration Management (EDM)* fue desarrollado como una alternativa al *Earned Value Management (EVM)* para la gestión de proyectos, especialmente en aquellos en los que los costos no son una variable crítica. A diferencia del EVM, que expresa el valor de las actividades en términos de costo, el EDM lo expresa en términos de períodos de trabajo. Esta metodología permite una estimación de las desviaciones en el cronograma y una previsión de la duración final del proyecto (Acebes et al., 2022).

El concepto de EDM fue introducido por Khamooshi y Golafshani (2014), quienes propusieron una metodología que mide el trabajo realizado durante cada período, eliminando la correlación entre costo y duración del proyecto que existe en la metodología EVM. Según ellos, el EDM está diseñado para el monitoreo y control del cronograma del proyecto, redefiniendo los parámetros del EVM en términos de períodos de trabajo en lugar de medidas de costo.

El EDM fue desarrollado para aplicarse tanto a niveles macro como micro, ofreciendo una visión general del progreso global del proyecto a nivel macro y controlando detalladamente el avance de actividades específicas a nivel micro. En este trabajo, las métricas se enfocarán en el nivel macro, las cuales se detallarán a continuación.

Magnitudes: En EDM, las magnitudes clave son:

Duración total planificada (TPD): Representa la suma de todas las duraciones planificadas para las actividades del proyecto hasta el momento de control.

$$TPD = \sum_{i=1}^n PD_i \quad (1.31)$$

donde PD_i es la duración planificada de la actividad i y n es el número de actividades planificadas hasta ese momento.

Duración real total (TAD): Corresponde a la suma de las duraciones actuales de todas las actividades del proyecto, reflejando el tiempo real transcurrido desde el inicio del proyecto hasta el punto de medición actual.

$$TAD = \sum_{i=1}^n AD_i \quad (1.32)$$

donde AD_i es la Duración Real de la actividad i y n es el número de actividades completadas hasta ese momento.

Duración ganada total (TED): La duración es la suma de la duración obtenida de todas las actividades.

$$TED = \sum_{i=1}^n ED_i \quad (1.33)$$

donde ED_i es la duración ganada de la actividad i y n es el número de actividades en progreso y completadas hasta ese momento.

Duración ganada en el tiempo t , $ED(t)$: Corresponde a la duración planificada de las actividades que se han completado hasta la fecha de medición. Esta métrica permite evaluar cuánto del cronograma planeado se ha completado efectivamente. La fórmula para calcular la duración ganada (ED) es:

$$ED(t) = t + \frac{TED - TPD_t}{TPD_{t+1} - TPD_t} \times 1(\text{UC}) \quad (1.34)$$

En esta ecuación, t representa el momento en el tiempo en el cual $TED \geq TPD_t$ y $TED \leq TPD_{t+1}$, y $1(\text{UC})$ significa una unidad de calendario.

Medidas de progreso y desempeño: Índice de progreso del proyecto (PPI): Mide el progreso general en términos de duración del proyecto.

$$PPI = \frac{ED(t)}{BPD} \quad (1.35)$$

donde BPD es la duración planificada basal.

Índice de desempeño de la duración (DPI): Mide la eficiencia del cronograma comparando la duración ganada con la duración real.

$$DPI = \frac{ED(t)}{AD} \quad (1.36)$$

Índice de duración ganada (EDI): Mide la cantidad de trabajo realizado en términos de duración ganada comparado con la duración planificada total hasta el momento.

$$EDI = \frac{TED}{TPD} \quad (1.37)$$

Métrica	Valor	Descripción
PPI	> 1	Proyecto adelantado respecto a la duración planificada
	< 1	Proyecto retrasado respecto a la duración planificada
DPI	> 1	Proyecto adelantado en comparación con el cronograma
	< 1	Proyecto retrasado en comparación con el cronograma
EDI	> 1	Más trabajo realizado de lo planificado
	< 1	Menos trabajo realizado de lo planificado

Cuadro 1.5: Medidas de progreso y desempeño del EDM

Pronósticos y otros usos:

- Estimación de la duración al completar (EDAC): Proporciona una estimación del tiempo adicional necesario para finalizar el proyecto, basada en el desempeño actual.

$$EDAC = \frac{BPD}{DPI} \quad (1.38)$$

- Estimación de la duración para completar (EDTC): Calcula el tiempo adicional necesario para completar el proyecto desde el punto actual.

$$EDTC = \left(\frac{BPD}{DPI} \right) - AD \quad (1.39)$$

- Variación de la duración (DV): Mide la diferencia entre la duración ganada y la duración planificada, indicando si el proyecto está adelantado o retrasado en términos de tiempo.

$$DV = ED(t) - AD \quad (1.40)$$

- Variación total de la duración (TDV):

$$TDV = TED - TPD \quad (1.41)$$

Métrica	Valor	Descripción
EDAC	> 1	Estimación de duración mayor que lo planificado
	< 1	Estimación de duración menor que lo planificado
EDTC	> 1	Más tiempo necesario para completar
	< 1	Menos tiempo necesario para completar
DV	> 0	Proyecto adelantado respecto al cronograma
	< 0	Proyecto retrasado respecto al cronograma
TDV	> 0	Duración ganada mayor que la planificada
	< 0	Duración ganada menor que la planificada

Cuadro 1.6: Pronósticos y otros usos del EDM

1.2.8. Gestión de riesgos cronograma-costos

Al considerar la duración de las actividades como la fuente de incertidumbre, en lugar de los costos directamente, el análisis se convierte en un análisis cuantitativo integrado de riesgo de costo y cronograma. Esto se debe a que, al introducir la incertidumbre en la duración de las actividades, se afectan automáticamente no solo los costos finales del proyecto, sino también las fechas de inicio y finalización calculadas para cada actividad y para el proyecto en su conjunto.

Este análisis evalúa cómo los riesgos y la incertidumbre afectan la duración total del proyecto y los costos. Sus salidas típicas incluyen distribuciones de probabilidad de la duración total y los costos, análisis de sensibilidad y diagramas de tornado para identificar los factores de riesgo más influyentes. Además, permite evaluar el impacto de las incertidumbres en las fechas clave y en los costos, determinar las probabilidades de cumplir las fechas y el presupuesto planificados, identificar los principales impulsores de riesgo y desarrollar planes de respuesta y reservas de contingencia. Finalmente, facilita el monitoreo y control activo de los riesgos del cronograma y de los costos durante la ejecución del proyecto.

1.2.8.1. Etapa 1. Estimación de la duración y costos de las actividades

En un proyecto estocástico, las duraciones y los costos de las actividades se estiman utilizando distribuciones de probabilidad para capturar la incertidumbre inherente. Esto permite reconocer la variabilidad natural de las duraciones y los costos, así como modelar los riesgos que pueden afectar ambas dimensiones.

La técnica PERT se utiliza para estimar las duraciones, mientras que para los costos se selecciona la distribución de probabilidad más adecuada según la naturaleza de la incertidumbre y la disponibilidad de datos. Las estimaciones probabilísticas de costos se integran en el modelo de simulación junto con las estimaciones probabilísticas de duraciones y la red de precedencias.

1.2.8.2. Etapa 2. Definir las relaciones de precedencia y asignar costos

Se deben definir las relaciones de precedencia entre las actividades y asignar los costos estimados a cada una. Los costos se registran utilizando los parámetros específicos de la distribución de probabilidad seleccionada, lo que permite una integración completa del análisis de cronograma y costos en el modelo de simulación. Estos valores se incorporan al modelo para que cada ejecución de la simulación tenga en cuenta tanto las variaciones en los costos como en las duraciones.

1.2.8.3. Etapa 3. Correlación entre duraciones y costos

Vose (2008) enfatiza la importancia de calcular las correlaciones en proyectos donde las variables de riesgo están interrelacionadas. Estas correlaciones se utilizan frecuentemente para modelar la relación entre diferentes variables de riesgo, como duraciones y costos. Para evaluar estas correlaciones, se puede utilizar el coeficiente de correlación de Pearson, que mide la relación lineal entre dos variables.

$$r = \frac{\sum(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x_i - \bar{x})^2 \sum(y_i - \bar{y})^2}} \quad (1.42)$$

donde:

x_i representa los valores de duración de una actividad.

y_i representa los valores de costo de la misma actividad.

\bar{x} y \bar{y} son las medias de los valores de duración y costo, respectivamente.

Esta fórmula permite cuantificar la relación entre la variabilidad en las duraciones y los costos de las actividades, proporcionando una medida de cómo una variable puede influir en la otra. Así, durante cada iteración de la simulación, se toman en cuenta las variaciones en las duraciones y los costos según las distribuciones de probabilidad y las correlaciones definidas.

Para lograr esto, se puede utilizar una matriz de correlación que define las relaciones entre las diferentes variables de riesgo. Esta matriz permite la generación de variables aleatorias correlacionadas, asegurando que las correlaciones entre duraciones y costos sean consideradas en el análisis de riesgos. La metodología descrita por Vose (2008) incluye la generación de variables aleatorias correlacionadas utilizando técnicas como la descomposición de Cholesky, lo que permite mantener la estructura de correlación durante la simulación.

La descomposición de Cholesky se expresa matemáticamente como:

$$A = LL^T \quad (1.43)$$

donde:

A es la matriz de correlación positiva definida.

L es una matriz triangular inferior.

L^T es la transpuesta de L .

Para generar variables aleatorias correlacionadas Z a partir de variables aleatorias independientes Y y la matriz de correlación A , se utiliza la siguiente relación:

$$Z = LY \quad (1.44)$$

De esta forma, Z tendrá las correlaciones especificadas por A . Esta técnica permite transformar un conjunto de variables independientes en un conjunto de variables correlacionadas, preservando la estructura de correlación definida en la matriz.

1.2.8.4. Etapa 4. Construir el modelo de simulación de cronograma y costos

Para construir el modelo de simulación de cronograma y costos, se integran las estimaciones de duraciones y costos probabilísticos, la red de precedencias y el cálculo de la ruta crítica. Este enfoque permite capturar la incertidumbre inherente en ambos aspectos del proyecto.

Primeramente, se incorporan las estimaciones de duraciones y costos probabilísticos para capturar la incertidumbre en las duraciones de las actividades y sus costos asociados. La red de precedencia es utilizada para asegurar que las dependencias entre actividades se respeten durante la simulación. Así, los costos por actividad también se incorporan al modelo de simulación para que cada ejecución de la simulación tenga en cuenta las variaciones en los costos junto con las duraciones. Finalmente, se incluye el cálculo de la ruta crítica y los costos críticos para identificar las actividades y costos que determinan la duración mínima y el costo total del proyecto.

Este modelo permite evaluar el impacto de las incertidumbres en las duraciones y costos de las actividades sobre la duración total y el costo total del proyecto. Mediante la simulación de Monte Carlo, se generan numerosos escenarios de fechas de finalización del proyecto y costos totales, construyendo así una distribución empírica de probabilidad para ambas dimensiones.

1.2.8.5. Etapa 5. Identificación preliminar de costos críticos

Después de definir las relaciones de precedencia y asignar los costos, es crucial realizar una identificación preliminar de los costos críticos, aquellos que pueden tener un impacto significativo en el costo total del proyecto debido a la variabilidad en las duraciones.

Para cada actividad, se calculan la media y la varianza de los costos basados en la distribución de probabilidad seleccionada. Según Vose (2008), estas métricas son fundamentales para entender la dispersión y la tendencia central de las distribuciones de costos.

Para identificar los costos críticos, es útil calcular una medida que combine la varianza del costo con la duración esperada de las actividades. Utilizando un coeficiente de variación ajustado por la duración de la actividad CV_{adj} , las actividades se priorizan en función de su impacto en el costo total del proyecto (Williams, 1992). La fórmula para calcular este coeficiente es la siguiente:

$$CV_{adj} = \frac{\sigma_C}{\mu_C \cdot \mu_D} \quad (1.45)$$

donde μ_D es la duración esperada de la actividad. Esta medida ajustada permite priorizar actividades considerando tanto la variabilidad de los costos como el tiempo.

Aquellas actividades con valores más altos de CV_{adj} se consideran más críticas en términos de costos debido a la mayor variabilidad relativa y su impacto potencial en el costo total del proyecto (Vanhoucke, 2015).

1.2.8.6. Etapa 6. Analizar e interpretar los resultados

Después de ejecutar la simulación, se obtienen distribuciones de probabilidad para la duración y el costo total del proyecto. Estas distribuciones pueden representarse gráficamente mediante funciones de densidad de probabilidad o funciones de distribución acumulada (curvas S).

Medidas de tendencia central y dispersión Es fundamental calcular estadísticas descriptivas, como la media, mediana, moda y otros percentiles relevantes, para ambas distribuciones. Estas medidas proporcionan información sobre las duraciones y costos más probables (tendencia central), así como sobre la variabilidad o dispersión de los valores en torno a la media.

Probabilidades de escenarios específicos Se construyen funciones de distribución acumulada empírica $F(t)$ para la duración total y $F(c)$ para el costo total del proyecto a partir de los resultados de la simulación. Esto permite evaluar, por ejemplo, la probabilidad de que la duración total exceda un límite máximo tolerable T y la probabilidad de que el costo total exceda un límite máximo tolerable C :

$$P(\text{duración total} > T) = 1 - F(T) \quad (1.46)$$

$$P(\text{costo total} > C) = 1 - F(C) \quad (1.47)$$

Estas curvas S resultantes muestran gráficamente las probabilidades, facilitando la toma de decisiones informadas sobre la gestión de riesgos del cronograma y los costos.

1.2.8.7. Etapa 7. Análisis de sensibilidad

El análisis de sensibilidad en el contexto del cronograma y los costos del proyecto es una técnica analítica utilizada para determinar qué riesgos o fuentes de incertidumbre presentes en el modelo de análisis cuantitativo tienen mayor influencia sobre la duración y el costo total del proyecto (Vanhoucke, 2015).

1.2.8.8. Etapa 8. Desarrollar planes de mitigación

Los planes de mitigación y monitoreo del cronograma y los costos se centran en ajustes de secuenciación de actividades, adición de buffers de tiempo y costo, refinamiento de las estimaciones de duración y costo, y establecimiento de fechas y presupuestos de contingencia para mitigar posibles retrasos e incrementos de costos identificados (Kerzner, 2013).

La reserva de contingencia del cronograma y costos (*Schedule and Cost Contingency Reserve - SCCR*) es un margen adicional de tiempo y costo incorporado al cronograma y al presupuesto para acomodar los riesgos e incertidumbres identificados por el análisis cuantitativo de riesgos. Su cálculo requiere dos componentes principales: la duración y el costo en el percentil de confianza deseado, así como una medida central de tendencia de la distribución de duraciones y costos simulados.

Los planes de mitigación y monitoreo del cronograma y los costos se centran en ajustes en la secuenciación de actividades, adición de buffers de tiempo y costo, refinamiento de las estimaciones de duración y costo, y establecimiento de fechas y presupuestos de contingencia para mitigar posibles retrasos e incrementos de costos identificados.

La reserva de contingencia del cronograma y costos (*Schedule and Cost Contingency Reserve - SCCR*) es un margen adicional de tiempo y presupuesto incorporado para abordar los riesgos e incertidumbres identificados mediante el análisis cuantitativo de riesgos. Para calcular la SCCR, se necesitan dos componentes principales: la duración y el costo en el percentil de confianza deseado, junto con una medida central de tendencia de las distribuciones simuladas de duraciones y costos.

Para determinar la duración y el costo en el percentil deseado, primero se identifica el percentil P en la distribución de probabilidad de las duraciones y costos totales obtenida a través de la simulación de Monte Carlo:

$$P = \frac{n + 1}{N} \cdot 100\% \quad (1.48)$$

Luego, todas las duraciones y costos totales simulados se ordenan de menor a mayor. El valor de la duración y el costo en el percentil deseado $D(P)$ se identifica en esta muestra ordenada. Finalmente, la reserva de contingencia del cronograma y costos (SCCR) se calcula como:

$$SCCR = D(P) - M \quad (1.49)$$

donde $D(P)$ es la duración y costo en el percentil deseado P y M es la medida central de tendencia de la distribución simulada (Vose, 2008).

1.2.8.9. Etapa 9. Monitoreo y control

En esta etapa será realizado el *Earned Value Management*(EVM) utilizando la simulación.

Capítulo 2

Los *softwares* de gestión de riesgos en proyectos

En el mercado existen numerosos softwares capaces de realizar análisis cuantitativos mediante la simulación de Monte Carlo. Tras revisar la bibliografía sobre estos programas, se presentan algunos ejemplos de los más utilizados en estudios de riesgos, junto con la información más relevante proporcionada por los proveedores.

De acuerdo con Vose (2023), hasta 2008 había dos complementos comerciales de simulación de Monte Carlo muy conocidos para realizar análisis de riesgo en Excel: *@RISK* y *Crystal Ball*, que han mantenido características similares durante más de una década. En 2008, se introdujo *ModelRisk* en el mercado. Aunque los dos primeros softwares han cambiado de desarrolladores a lo largo del tiempo, las empresas detrás de estos tres complementos son actualmente las más reconocidas en términos de análisis de riesgos en Excel. Cada una ofrece productos integrados de análisis de riesgos que operan en diferentes entornos, siendo relevantes para este trabajo:

Vose Software: Cuenta con *ModelRisk*, un complemento de Excel para análisis de riesgos que realiza una simulación de Monte Carlo. También ofrece *Tamara*, una herramienta independiente para el análisis de riesgos de cronograma y costos en proyectos.

Lumivero: Desarrolla complementos para Excel que forman parte de la *DecisionTools 8 Suite*, incluyendo *@RISK* para análisis de riesgos, *PrecisionTree* para análisis de decisiones probabilísticas, *TopRank* para análisis de sensibilidad y escenarios, y *ScheduleRiskAnalysis* para análisis de riesgos en proyectos.

Oracle: Desarrolla el complemento de Excel para análisis de riesgos *Crystal Ball*. Además, ofrece *Primavera P6 Enterprise Project Portfolio Management*, una solución independiente para la gestión de programas, carteras y proyectos.

2.1. *Add-in* para simulación Monte Carlo: Análisis de riesgo cuantitativo

Aunque el Excel permite la simulación de Monte Carlo e incluye la incertidumbre en sus modelos de hoja de cálculo, este proporcionará una única estimación del resultado modelado. Además, carece de la funcionalidad, capacidad y potencia necesarias para realizar los análisis *what-if* requeridos en el modelado predictivo. Por lo tanto, los complementos de Excel basados en simulación de Monte Carlo

han progresado rápidamente, concentrando su área de aplicación principalmente en el sector financiero y en la gestión de riesgos industriales.

2.1.1. ModelRisk y ModelRisk ResultsViewer

La primera variante del software, lanzada en 2007, fue diseñada específicamente para el sector financiero y la industria de seguros. ModelRisk es desarrollado por la empresa Vose Software, que ha sido líder en innovación en el mercado desde 2009, siendo la primera en introducir muchas características técnicas del método Monte Carlo que facilitan la construcción, auditoría y prueba de modelos de riesgo. Utiliza el *ModelRisk ResultsViewer*, que permite la visualización de los resultados obtenidos.



Figura 2.1: Barra de herramientas - Modelrisk

Es presentado en las ediciones básica, que es gratuita, y la completa. Proporciona una amplia gama de distribuciones de probabilidad y funciones estadísticas para modelar variables inciertas.

		Básica	Completa
Características	Número de distribuciones	9	136
	Número de modelos de correlación (cópulas)	1	11
	Número de series temporales	1	32
	Número total de funciones	39	1222
Ajuste	Ajuste de distribuciones a datos	6	95
	Ajuste de estructuras de correlación a los datos	1	11
	Ajuste de series temporales a datos	1	25

Cuadro 2.1: ModelRisk en números. Fuente: Vose (2023).

De acuerdo con Vose (2023) ModelRisk es el simulador más rápido en Excel y tiene tres veces la funcionalidad de su competidor más cercano. En cuanto a las características de la simulación, están:

Una vez que se completa una ejecución de simulación, se abre el *Results Viewer*, que muestra listas de las diferentes entradas y salidas aleatorias del modelo, así como las distintas simulaciones realizadas.

2.1. ADD-IN PARA SIMULACIÓN MONTE CARLO: ANÁLISIS DE RIESGO CUANTITATIVO27

		Básica	Completa
Simulación	Velocidad sin restricciones y tamaño del modelo	X	X
	Simulación Monte Carlo	X	X
	Múltiples ejecuciones de simulación para escenarios	X	X
	Ejecuta macros antes, durante o después de la simulación	X	X
	VBA y C++ a las funciones de ModelRisk	X	X
	Control de precisión de resultados		X

Cuadro 2.2: ModelRisk - Simulación. Fuente: Vose (2023).

		Básica	Completa
Informes	Informes completos de simulación gráfica	X	X
	Informes estadísticos completos	X	X
	Ver resultados de simulación estadística en hoja de cálculo	X	X
	Exportar resultados a PowerPoint, Word, PDF o Excel	X	X
	Comparta los resultados usando Result Viewer	X	X
	Análisis de sensibilidad y de escenarios	X	X
	Funciones de informes estadísticos en hojas de cálculo		X

Cuadro 2.3: ModelRisk - Informes. Fuente: Vose (2023).

Y es posible encontrar los siguientes resultados del modelo:

Resultados de la simulación
Box plot
Acumulativo
Histograma
Pareto
Scatter plots
Spider plot
Trend plot
Tornado
Tabla de datos de simulación

Cuadro 2.4: ModelRisk - Resultados del modelo. Fuente: Vose (2023).

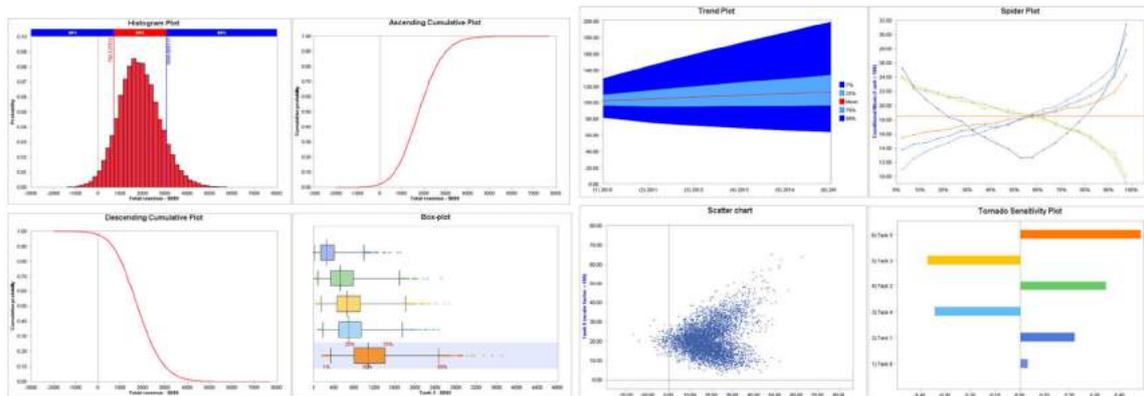


Figura 2.2: ModelRisk - Resultados del modelo

Figura 2.3: ModelRisk - Resultados del modelo

2.1. ADD-IN PARA SIMULACIÓN MONTE CARLO: ANÁLISIS DE RIESGO CUANTITATIVO29

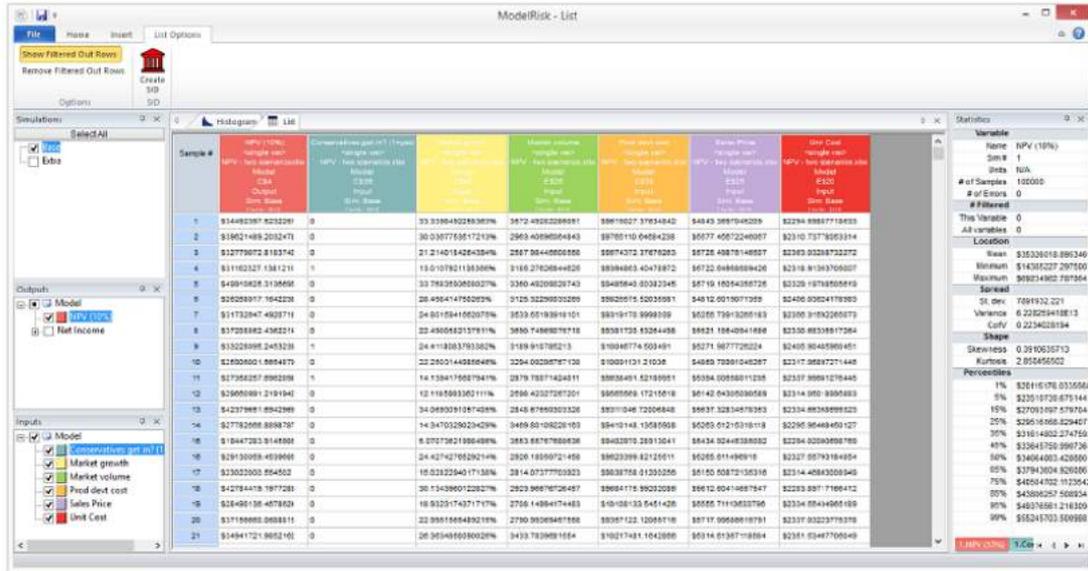


Figura 2.4: Tabla de datos de simulación. Fuente: Vose (2023)

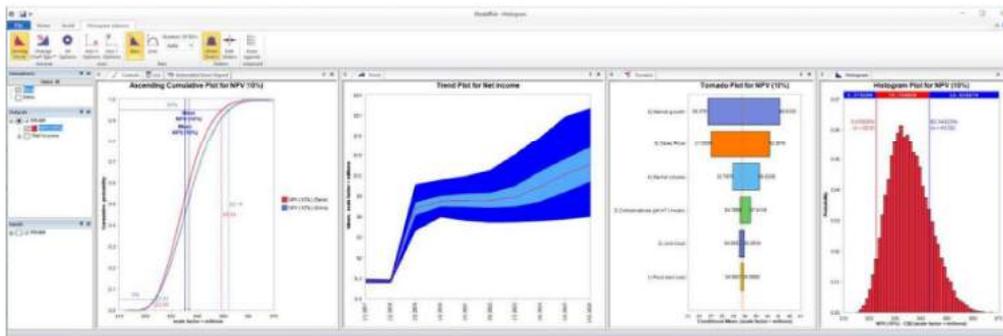


Figura 2.5: Informe con ModelRisk ResultsViewer. Fuente: Vose (2023)

Proporciona una interfaz fácil de usar y funciones estadísticas y de modelado avanzadas para respaldar un análisis de riesgos sofisticado y la toma de decisiones. Con un diseño simple, ModelRisk ayuda a construir modelos intuitivamente y controla los errores en todas las funciones, señalando dichos errores. Además, cuenta con interfaces de usuario visuales, un archivo de ayuda completo con ejemplos, modelos, videos e informes de plantillas.



Figura 2.6: Ejemplos de mensaje de error en los softwares ModelRisk X @Risk. Fuente: Vose (2023)

		Básica	Completa
Facilidad de uso	Vista de funciones con un solo clic	X	X
	Conversores @RISK y CrystalBall	X	X
	Full help file and example models	X	X
	Mensajes de error informativos	X	X
	Descripciones de funciones en hoja de cálculo	X	X
	Descripciones de parámetros en hoja de cálculo	X	X

Cuadro 2.5: ModelRisk - Facilidad de uso. Fuente: Vose (2023).

En cuanto a las características generales y técnicas:

2.1. ADD-IN PARA SIMULACIÓN MONTE CARLO: ANÁLISIS DE RIESGO CUANTITATIVO31

		Básica	Completa
Características generales	Supuestos y resultados compartidos entre modelos (SIDs)		X
	Visor de datos		X
	Herramientas de elicitación de expertos		X
	Combinación de estimaciones de expertos		X
	Herramientas de valor extremo		X
	Conectividad de base de datos		X
Características técnicas	Distribuciones acotadas y desplazadas	X	X
	Cálculos de probabilidad		X
	ModelRisk objects		X
	Herramientas de cadena de Markov		X
	Herramientas Bootstrap		X
	Herramientas Stop Sum y SumProduct		X
	Herramienta de eventos de riesgo		X
	Soporte Six Sigma		X
	Simulación de ecuaciones diferenciales ordinarias		X
	Integración numérica e interpolación		X
	Distribución splicing		X
	Média bayesiana para modelos ajustados		X

Cuadro 2.6: ModelRisk - Características generales y técnicas. Fuente: Vose (2023).

Siempre apuesta por la mejora. En su versión actual (6.2.10) es capaz de convertir más del 98% de las funciones utilizadas por @RISK y Crystal Ball. Los gráficos Tornado en el modo *Percentil acumulativo condicional* reaccionan a un cambio manual del valor del percentil, entre otros ajustes. Además, presenta funcionalidades específicamente destinadas al sector industrial.

		Básica	Completa
Herramientas industrial	Herramientas financieras		X
	Herramientas de seguros		X
	PK/PD herramientas farmacéuticas		X

Cuadro 2.7: ModelRisk - Herramientas industrial. Fuente: Vose (2023).

2.1.2. @Risk

Desarrollado por Lumivero, @RISK es un componente de la DecisionTools 8 Suite que también se puede adquirir como un programa independiente. Está en su versión 8.5 y dispone de las ediciones *Professional* e *Industrial*, diseñadas para los modelos más grandes y complejos. Todo lo que ofrece @RISK *Professional* está incluido en @RISK *Industrial*. Proporciona una biblioteca de distribuciones de probabilidad para modelar variables inciertas y asigna fácilmente distribuciones adecuadas a las variables de entrada.



Figura 2.7: @Risk - Barra de herramientas. Fuente: Lumivero (2023)

En cuanto a las características generales de ambas ediciones, se incluyen la actualización de gráficos e informes durante la simulación para ilustrar a otros y la personalización de las simulaciones según necesidades específicas.

Características generales
Modo de demostración y actualización en vivo
Amplio control de configuración
Gráficos totalmente personalizables con calidad de presentación

Cuadro 2.8: @Risk - Características generales para ambas ediciones. Fuente: Lumivero (2023).

En cuanto al modelado:

2.1. ADD-IN PARA SIMULACIÓN MONTE CARLO: ANÁLISIS DE RIESGO CUANTITATIVO33

Modelado	
Característica	Beneficio
Paleta de distribución y comando Insertar función	Definición fácil y precisa de factores inciertos
Ajuste de distribución	Usar datos y juicio de expertos para definir factores inciertos
Más de 90 funciones de distribución integradas	Representa prácticamente cualquier factor incierto para un modelado preciso
@RISK Function Swap	Elimina (y luego restaura) las funciones de @RISK para compartir modelos con usuarios que no sean de @RISK
Distribuciones predefinidas	Crea distribuciones personalizadas con sus propios parámetros y nombres
Función compuesta	Combina dos distribuciones en una, para agilizar seguros u otros modelos grandes
Parámetros de distribución de percentiles	Maneras más flexibles de definir la incertidumbre
Correlación y Cópulas	Correlación estándar disponible, junto con cópulas, que proporcionan métodos sofisticados para correlacionar variables inciertas de @RISK que permiten un mayor control sobre el patrón de correlación.
@RISK Data Viewer	Muestra los datos de cualquier hoja de cálculo usando todos los cuadros y opciones de gráficos de @RISK .
Excel Developer Kit (XDK)	Automatiza y personaliza @RISK para Excel a través de una biblioteca de comandos y funciones que le permiten controlar todos los aspectos de @RISK en su hoja de cálculo

Cuadro 2.9: @Risk - Modelado para ambas ediciones. Fuente: Lumivero (2023).

En cuanto a los resultados de la simulación:

Resultados de la simulación
Histogramas, área, línea, acumulativo, resumen, box plot y gráficos superpuestos
Gráficos de tornado y diagramas de dispersión
Análisis de sensibilidad y escenarios
Funciones six sigma
Analisis de stress
Advanced Sensitivity Analysis
@RISK Goal Seek

Cuadro 2.10: @Risk - Resultados de la simulación para ambas ediciones. Fuente: Lumivero (2023).

El @RISK Goal Seek utiliza múltiples simulaciones para encontrar un valor de entrada que logre un resultado de simulación objetivo especificado. Permite realizar un análisis de sensibilidad y análisis de escenarios, definiendo múltiples conjuntos de valores de entrada y evaluando los resultados para cada escenario. También permite optimizar modelos especificando objetivos y restricciones, e identificar

estrategias para mitigar los riesgos y maximizar las recompensas potenciales.

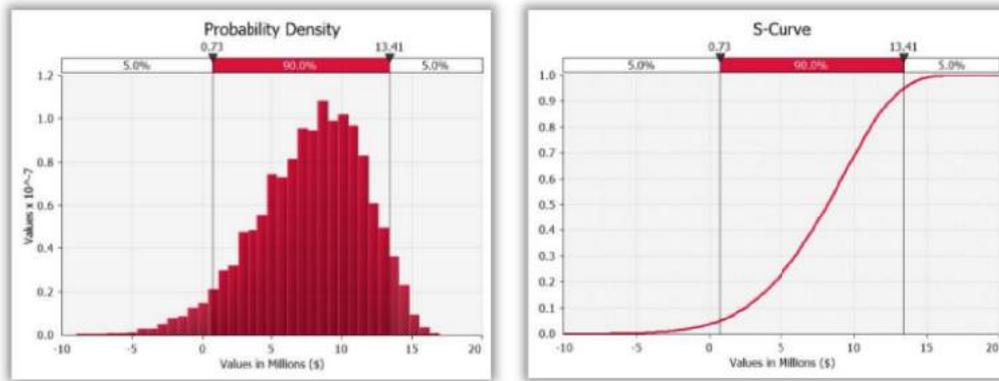


Figura 2.8: @Risk - Resultados de la simulación. Fuente: Lumivero (2023)

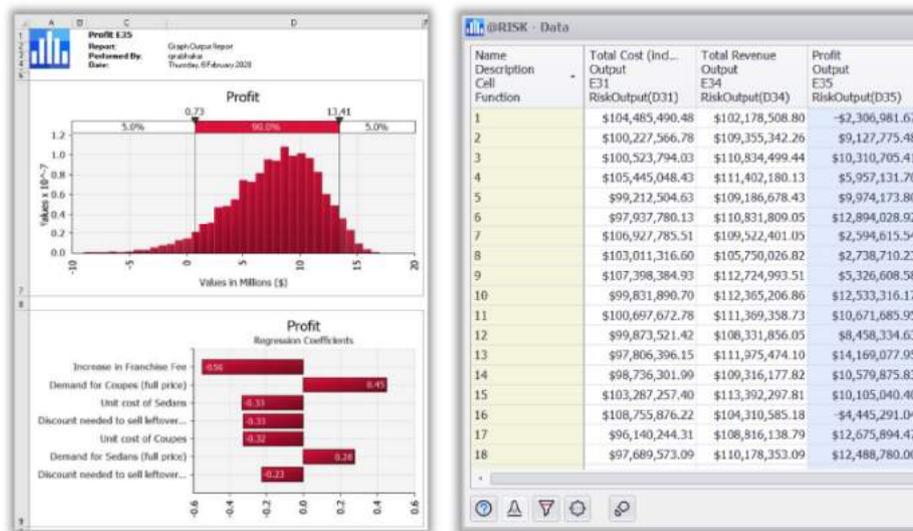


Figura 2.9: @Risk - Resultados de la simulación. Fuente: Lumivero (2023)

La edición industrial presenta las siguientes características:

Características de la edición industrial
Simulación de pronósticos de series de tiempo
Correlación de Series Temporales
Procesador multinúcleo y compatibilidad con varias CPU

Cuadro 2.11: @Risk - Características de la edición industrial. Fuente: Lumivero (2023).

De acuerdo con Lumivero (2023), @RISK Industrial combina la simulación Monte Carlo con sofisticadas técnicas de optimización para encontrar soluciones óptimas a problemas inciertos. Ofrece una configuración optimizada y edición de modelos, permitiendo encontrar la mejor solución global mientras se evita quedar atrapado en soluciones locales de *hill-climbing*. Además, permite visualizar instantáneamente los efectos de hasta tres soluciones en todo el modelo. También cuenta con la función *RISKOptimizer*, que resuelve problemas con mayor precisión.

RISKOptimizer
Optimización bajo incertidumbre
Análisis de frontera eficiente
Rangos para celdas ajustables y restricciones
Algoritmos genéticos
Seis métodos de resolución, incluidos GAs y OptQuest
Monitoreo de convergencia y RISKOptimizer Watcher
Superposición de distribución optimizada frente a original
Original, mejor, última actualización del modelo

Cuadro 2.12: @Risk - RISKOptimizer. Fuente: Lumivero (2023).

2.1.3. *Crystal Ball*

Crystal Ball fue desarrollado por *Decisioneering* en 1986 y actualmente pertenece a Oracle. De acuerdo con Oracle (2023), es la aplicación líder basada en hojas de cálculo para modelado predictivo, previsión, simulación y optimización. En su versión 11.1.3.0.0, ofrece las ediciones *Oracle Crystal Ball*, *Oracle Crystal Ball Decision Optimizer*, *Oracle Crystal Ball Enterprise Performance Management* y *Oracle Crystal Ball Enterprise Performance Management Decision Optimizer*.



Figura 2.10: Crystal Ball - Barra de herramientas. Fuente: Oracle (2023)

Para las cuatro ediciones presenta:

Herramientas

Batch Fit

Matriz de correlación

Tornado (sensibilidad)

Bootstrap

Tabla de decisiones

Análisis de escenario

Simulación bidimensional

Cuadro 2.13: *Crystal Ball* - Herramientas. Fuente: Oracle (2023)

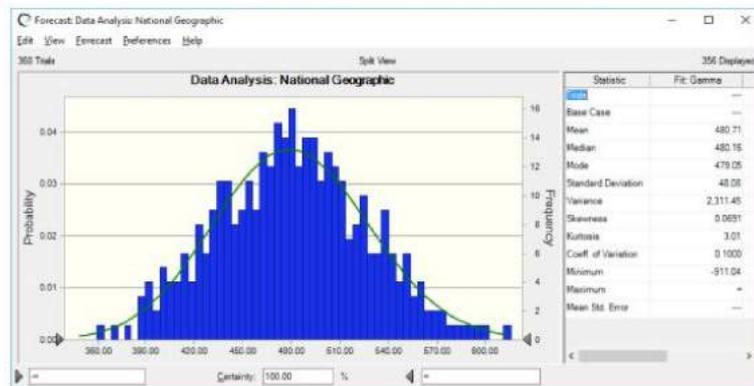


Figura 2.11: *Crystal Ball* - Análisis de datos. Fuente: Oracle (2023)

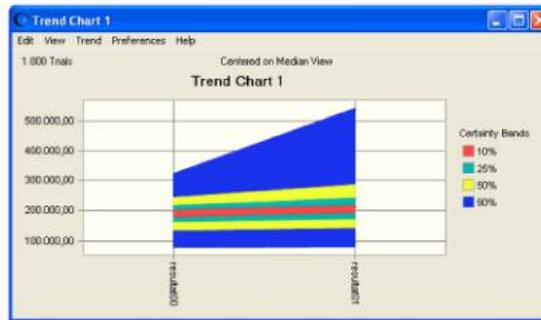
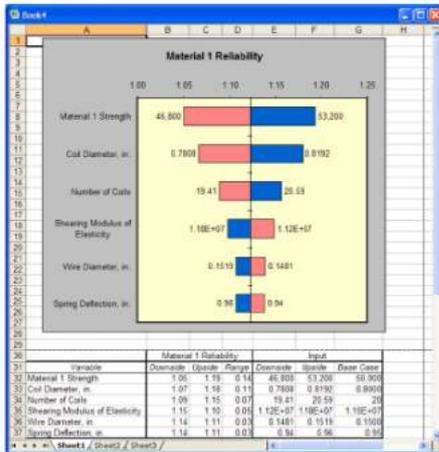


Figura 2.12: *Crystal Ball* - Resultados del modelo
 Figura 2.13: *Crystal Ball* - Resultados del modelo

La tabla de decisiones ejecuta automáticamente múltiples simulaciones para probar diferentes valores para uno o dos variables de decisión. A continuación, puede analizar los resultados en *Crystal Ball* utilizando el pronóstico, la tendencia, y gráficos superpuestos Oracle (2023).

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
	Trend Chart											
	Overlay Chart											
	Forecast Chart											
1		Facility size (50,00)	Facility size (100,00)	Facility size (150,00)	Facility size (200,00)	Facility size (250,00)	Facility size (300,00)	Facility size (350,00)				
2		19.26	181.92	255.13	258.11	233.56	213.82	203.82				
3		1	2	3	4	5	6	7				
4												
5												
6												
7												
8												
9												
10												

Figura 2.14: *Crystal Ball* - Tabla de decisiones. Fuente: Oracle (2023)

Crystal Ball incluye funciones de capacidad de proceso que respaldan la mejora de la calidad mediante prácticas como Six Sigma, DFSS (Diseño para Six Sigma) y principios Lean. Es posible interpretar rápidamente la capacidad de un proceso o producto sin tener que salir de *Crystal Ball*. Se pueden ver los resultados de simulación, estadísticas descriptivas y métricas de capacidad, todo de una vez con tablas y gráficos en vista dividida. Las métricas de capacidad incluyen Cp/CpK, Pp/Ppk y otras. Esta funcionalidad está disponible en todas las ediciones.

Las ediciones con OptQuest ofrecen una simulación 100 veces más rápida que la edición estándar. La edición *Enterprise* tiene capacidades de integración con Oracle Enterprise Performance Management y Oracle Applications.

2.2. Softwares para riesgos en proyectos

Han sido analizados *softwares* de las mismas empresas que la simulación pura de Montecarlo en complemento para excel, pero con funciones para proyectos.

2.2.1. Tamara

Desarrollado por la empresa Vose, está diseñado principalmente para realizar análisis cuantitativos de riesgos mediante simulación Monte Carlo y otras técnicas estadísticas, permitiendo la evaluación de riesgos en cronograma y costos. Con una interfaz amigable, requiere un conocimiento mínimo de estadísticas y funciona con Primavera o MS Project sin necesidad de crear cronogramas separados, manejando cronogramas de casi cualquier tamaño con rapidez. Es posible cuantificar la incertidumbre de los costos y las fechas de entrega del proyecto y utilizar los resultados en el modelo de ModelRisk para construir una evaluación más completa del desempeño (Vose, 2023). Está en su versión 3.0 y tiene las ediciones básica, que es gratuita, y completa.



Figura 2.15: Barra de herramientas - Tamara

En cuanto a la simulación, ambas ediciones tienen:

Simulación

Velocidad sin restricciones y tamaño de cronograma

Simulación Monte Carlo

Control de la secuencia de números aleatorios

Control de muestras generadas

Control de CPUs en uso

Cuadro 2.14: Tamara - Simulación. Fuente: Vose (2023).

Tamara puede manejar cronogramas de cualquier tamaño y es el simulador más rápido del mercado. Presenta amplia gama de herramientas para describir los riesgos e incertidumbres.

	Básica	Completa
Incertidumbre de alcance	X	X
Incertidumbre de costo fijo		X
Tasa de costo incertidumbre		X
Incertidumbre de la productividad		X
Eventos de riesgo de productividad		X
Eventos de riesgo específicos de la tarea (impacto en el costo y/o el tiempo)		X
Riesgo de trabajo adicional		X
Riesgo de interrupción del sitio		X

Cuadro 2.15: Tamara - Herramientas de modelado de riesgo. Fuente: Vose (2023).

De acuerdo con Vose (2023), en su nueva versión, existe una libertad casi ilimitada para describir la incertidumbre en torno a la duración y los costos de las tareas, así como la frecuencia y magnitud de los riesgos, y cualquier interdependencia relevante para un análisis particular. Todo esto puede ser modelado en un entorno de hoja de cálculo conocido, fácil de usar y potente, enriquecido por un conjunto completo de herramientas de análisis de riesgos que incluye 136 distribuciones de probabilidad diferentes, 34 modelos de series de tiempo y 14 modelos de correlación.

En cuanto a las variables de informe:

	Básica	Completa
Fecha de inicio de tarea o hito	X	X
Fecha de finalización de la tarea o hito	X	X
Duración de la tarea o grupo	X	X
Costo de la tarea o grupo		X
Costo por periodo		X
Costo acumulativo		X

Cuadro 2.16: Tamara - Variables de informe. Fuente: Vose (2023).

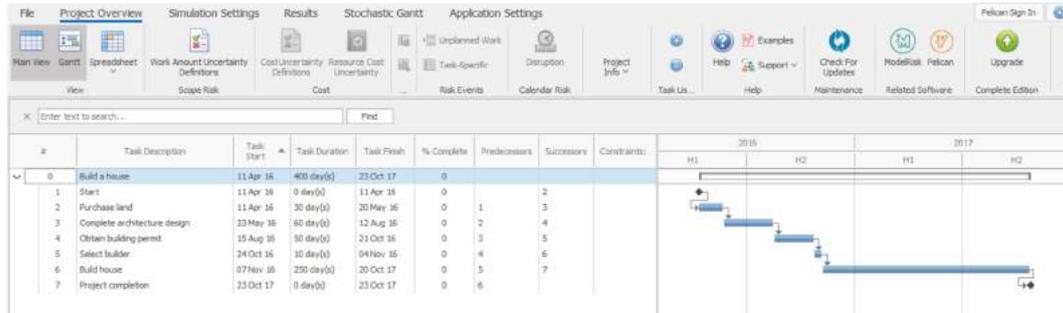


Figura 2.16: Tamara- Visión general de proyecto. Fuente: Vose(2023)

En cuanto a tipos de informes

	Básica	Completa
Histograma	X	X
Acumulativo ascendente (curva s)	X	X
Acumulativo descendente	X	X
Pareto (histograma +acumulativo)	X	X
Trend		X
Costo de dispersión v fecha de finalización		X
Trend + scatter		X
Tornado (sensibilidad)	X	X
Estadísticas	X	X
Diagrama de Gantt estocástico	X	X

Cuadro 2.17: Tamara - Tipos de informes. Fuente: Vose (2023).

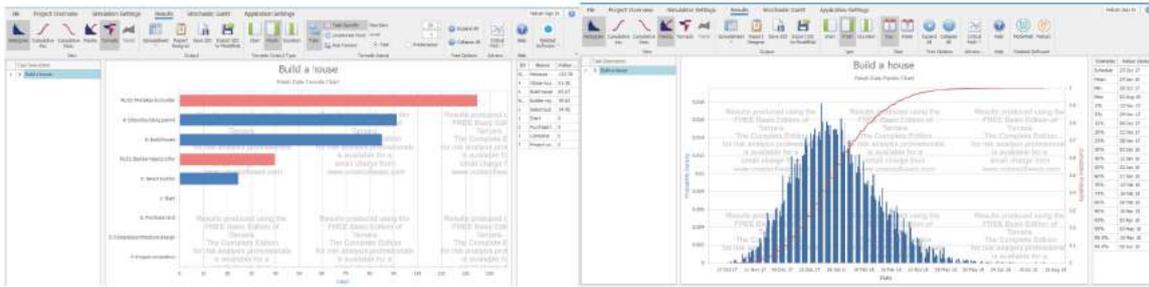


Figura 2.17: Tamara - Resultados del modelo

Figura 2.18: Tamara- Resultados del modelo

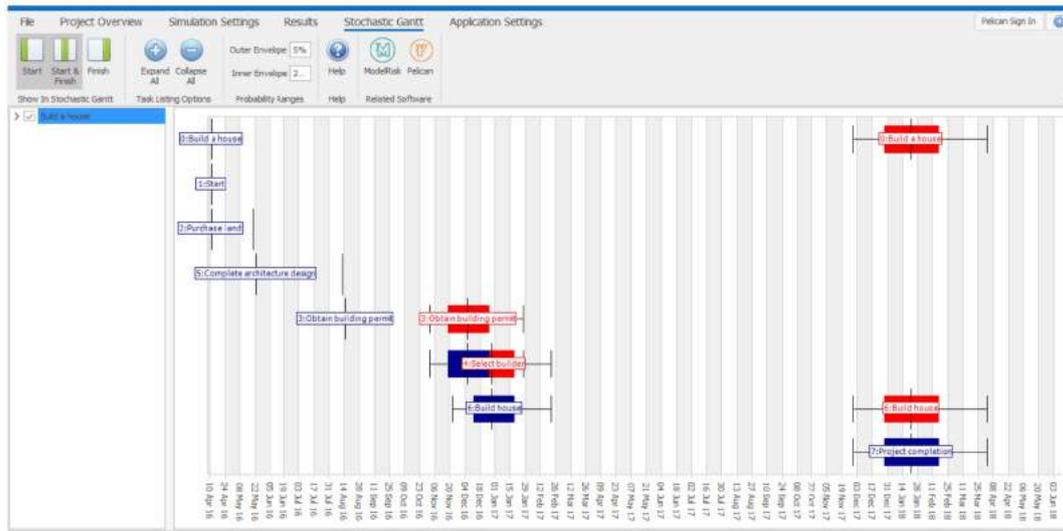


Figura 2.19: Tamara- Diagrama de Gantt estocástico. Fuente: Vose(2023)

En cuanto al diseño de informe:

	Básica	Completa
Informes de plantilla estándar	X	X
Informes de plantillas personalizadas	X	X
Imprimir informes	X	X
Exportar a PDF, word, excel, imagen, archivo web	X	X
Informe de correo electrónico	X	X
Agregue texto formateado, imágenes, gráficos, marca de agua	X	X

Cuadro 2.18: Tamara - Diseño de informes. Fuente: Vose (2023).

	Básica	Completa
Archivo de ayuda	X	X
Modelos de ejemplo	X	X
Control de moneda utilizada y formato		X

Cuadro 2.19: Tamara - Otros. Fuente: Vose (2023).

2.2.2. Primavera

Desarrollado por Oracle, *Primavera P6 Enterprise Project Portfolio Management* forma parte de la suite *Oracle Primavera*, una herramienta de gestión de proyectos que permite la planificación, seguimiento y control de proyectos complejos gracias a sus sólidas capacidades y escalabilidad.

Primavera P6 realiza el análisis de costos y cronogramas mediante el método *Monte Carlo*. Ampliamente utilizado en la industria de la construcción, ingeniería y sectores relacionados, *Primavera P6* permite a los usuarios programar tareas, asignar recursos, establecer dependencias y gestionar la programación del proyecto. También ofrece capacidades avanzadas de informes y análisis de rendimiento. Planifica los riesgos del proyecto con una solución para modelar, clasificar, analizar el impacto, calcular la probabilidad de ocurrencia y generar planes de mitigación. Gestiona los riesgos a lo largo de todo el ciclo de vida del proyecto, analiza los cronogramas y costos para identificar sus niveles de confianza, evalúa la madurez del programa e identifica riesgos. Genera planes de contingencia y analiza su efectividad, y evalúa los riesgos mediante gráficos de distribución, tornado y dispersión (Oracle, 2023).

Sus capacidades clave en cuanto a cronograma incluyen: definir las actividades del proyecto y establecer dependencias entre tareas. Es compatible con el método *ruta crítica* (CPM).

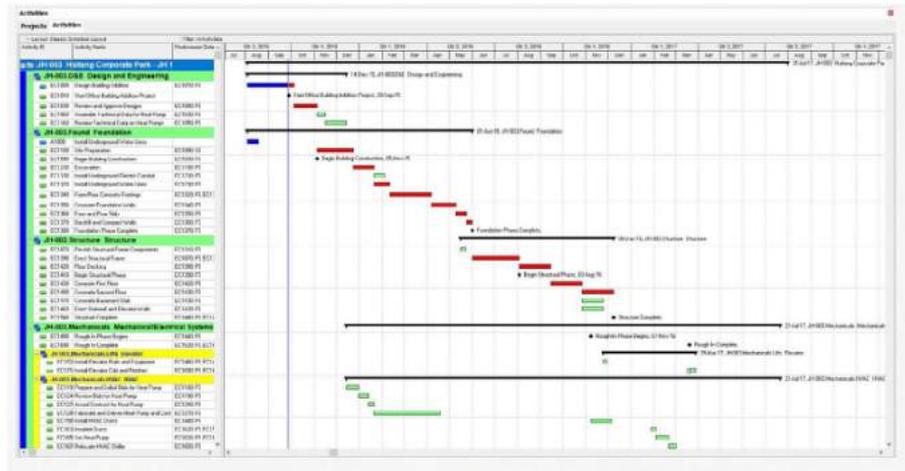


Figura 2.20: Diagramas de Gantt de actividades interactivas
Fuente: Oracle (2023)

Al planificar el trabajo, la duración del proyecto se ingresa en el campo de *duración original*. La duración real solo puede ser introducida para las actividades del proyecto que se han completado.

Por ser más completa para la gestión de proyectos, es posible apreciar los *outputs* para *Earned Value Management* en el *Primavera Unifier EVM*.

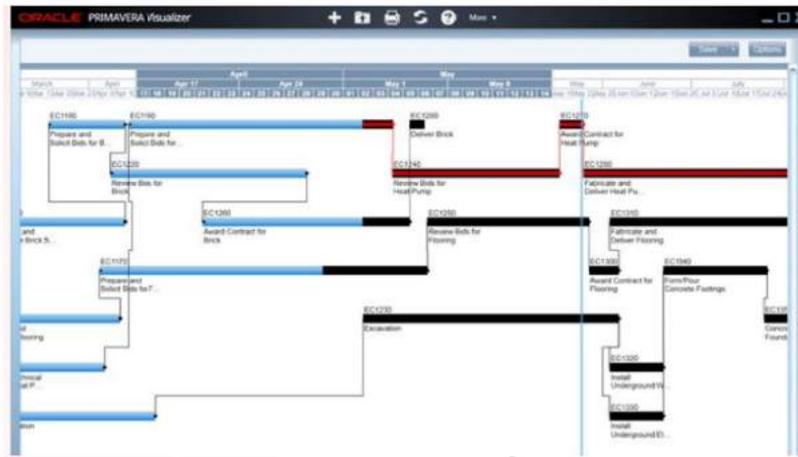


Figura 2.21: Diagrama de Gantt
Fuente: Oracle (2023)

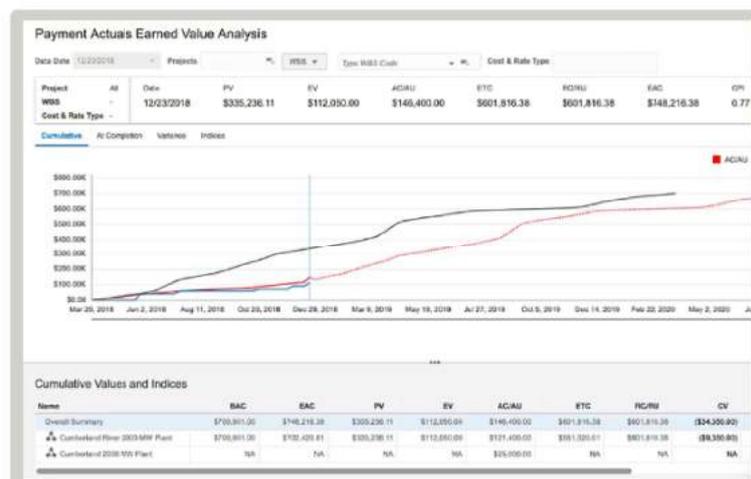


Figura 2.22: Primavera Unifier EVM
Fuente: Oracle (2023)

2.3. Elección

En términos generales, para la adopción de software como los aquí estudiados, se deben cumplir algunos requisitos básicos, tales como:

- Una función de análisis de influencia o sensibilidad en la que los factores de riesgo identificados, después de la simulación, y la estructura variable previamente definida puedan ser examinados de manera más detallada, especificada o corregida.
- La posibilidad de crear correlaciones simples o, además, dependencias multidimensionales entre los valores de entrada inciertos dentro y/o entre varios períodos.
- Un número suficiente de ejecuciones de simulación para que se pueda generar una distribución de resultados suficientemente estable y libre de errores.

- Varias opciones de visualización gráfica que permitan una visualización, análisis y ajuste versátiles de los resultados generados.
- Amplias funciones de soporte y explicaciones para el aprendizaje del software.

La elección de los *softwares* de complemento para Excel puede depender de las preferencias personales, la valoración empresarial basada en simulación, la experiencia previa o la integración con otro software o sistemas comerciales. Estas diferencias resaltan las áreas de enfoque y la funcionalidad central de cada software, así como la funcionalidad deseada al seleccionar el software de análisis de riesgos.

El criterio principal para este proyecto es la funcionalidad en cuanto a lo que converge con los riesgos del proyecto. En este ámbito, los tres *softwares* tienen características que cumplen con los requisitos. La principal diferencia entre sus funcionalidades está en el alcance en otros segmentos que no tienen referencia en este trabajo.

Una vez que los tres *softwares* cumplen con los propósitos para este trabajo, la intuición y la facilidad de uso de la interfaz de usuario son decisivas. Esto permite que las funciones y características sean fáciles y rápidas de usar. Dado el tiempo limitado para acceder a las versiones de prueba, si el *software* es de más fácil manejo y brinda más acceso a ayuda y comprensión sobre su uso, esto optimiza el tiempo y la experiencia de la prueba. De esta forma, *ModelRisk* es el más adecuado. El informe de *ModelRisk* es ordenado, mientras que, si se compara con los informes de *@RISK*, por ejemplo, estos se dividen entre muchas interfaces diferentes y el trazado de gráficos se convierte rápidamente en una confusión de ventanas separadas. El informe de *ModelRisk* es más ordenado.

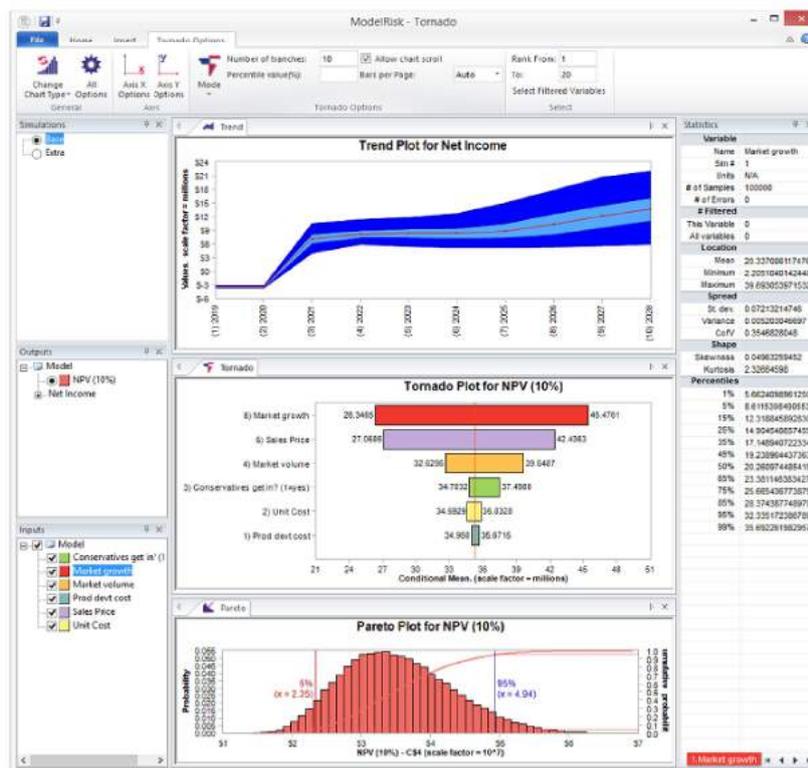


Figura 2.23: Outputs @ModelRisk
Fuente: Vose (2023)

En cuanto al *software* de gestión de riesgos en términos de cronograma y costos, *Primavera* es difícil de acceder a una versión de prueba, dado que es una herramienta de gestión de proyectos en general. Por lo tanto, ha sido posible conocer sus *outputs* únicamente a través de diversas fuentes.

Las funcionalidades de *Tamara*, en su versión completa, se ajustan bien a las necesidades de este trabajo. Encontrar información acerca de *Tamara* no es muy fácil, pero en su sitio web hay detalles sobre algunas herramientas y cuenta con el libro que sirve de base para este proyecto, escrito por el propio desarrollador, Dave Vose. Además, para un poder de análisis de riesgos aún mayor, se puede cuantificar la incertidumbre de costos y fechas de entrega del proyecto, y luego usar esos resultados en *ModelRisk* para construir una evaluación más realista del presupuesto.

Capítulo 3

Programación en R

Tras analizar los *softwares* y con el creciente uso del entorno de programación *R*, la propuesta de este trabajo es aportar funcionalidades en este entorno para la gestión de riesgos en proyectos, utilizando algunos resultados útiles ya disponibles en el *software* estadístico y otras presentes en la literatura utilizada.

Para la programación se utilizarán principalmente los paquetes *Triangle* (Carnell, 2022) y *ProjectManagement* (Dosantos et al., 2022), siendo este último complementado con las nuevas funciones creadas.

No será necesario crear un paquete específico para el tema, ya que el paquete *ProjectManagement*, además de tener resultados que se utilizarán en la programación, tiene un propósito más amplio para la gestión de riesgos en proyectos con funcionalidades para análisis cuantitativo de riesgos, asignación de recursos y tratamiento de atrasos. El paquete *Triangle* es específico para la creación y el estudio de distribuciones triangulares, que son especialmente útiles en la gestión de riesgos y proyectos debido a su simplicidad y capacidad para modelar estimaciones subjetivas de manera efectiva. Existe el paquete *Criticalpath*, pero fue diseñado para tratar con proyectos determinísticos y no será considerado en este proyecto.

3.1. El paquete ProjectManagement

El paquete *ProjectManagement* es una biblioteca en *R* diseñada para gestionar problemas de proyectos determinísticos y estocásticos. Proporciona una variedad de funciones para obtener la duración del proyecto, holguras de las actividades, programación de actividades, asignación de recursos y análisis cuantitativo de riesgos relacionados con costos y cronograma.

En un contexto determinístico, permite calcular cronogramas, asignar recursos de forma optimizada y, en caso de que ocurran retrasos, distribuirlos de manera justa entre las actividades utilizando reglas como proporcional, troncada o *Shapley*. En el contexto estocástico, con duraciones de actividades inciertas, el paquete proporciona la duración media esperada del proyecto, la densidad de probabilidad de la duración total y la densidad de probabilidad de los tiempos iniciales y finales de algunas actividades seleccionadas. La distribución justa de retrasos en proyectos estocásticos se realiza mediante la regla

de *Shapley* estocástica, basada en el valor de *Shapley*, desarrollada en la tesis de Dosantos (2022), que dio origen al paquete. Las mismas funciones de asignación y nivelación de recursos pueden aplicarse tanto en contextos determinísticos como estocásticos. Sus funcionalidades son:

dag.plot:

Permite visualizar gráficamente la red de precedencias entre las actividades, una representación acíclica dirigida (DAG - *Directed Acyclic Graph*). Además, resalta las actividades críticas en un color diferente, facilitando su identificación visual inmediata dentro de la red de precedencias.

delay.pert:

Permite analizar los retrasos observados en proyectos determinísticos finalizados y distribuir de manera justa esos retrasos entre las actividades. Implementa tres reglas: la regla proporcional, que asigna el retraso total proporcionalmente a los retrasos individuales de cada actividad; la regla proporcional truncada, similar pero limitando el retraso asignado al retraso total del proyecto; y la regla de *Shapley*, que considera la contribución marginal de cada actividad al retraso total, teniendo en cuenta todas las posibles coaliciones de actividades retrasadas. Esto permite identificar las actividades que más contribuyeron al retraso, determinar asignaciones justas de responsabilidad, comparar retrasos reales vs. planificados y calibrar modelos de estimación de duraciones.

early.time, last.time:

La función *early.time* calcula los tiempos de inicio más tempranos (*Early Start* - ES) de cada actividad realizando un recorrido hacia adelante desde el inicio del proyecto, y la función *last.time* calcula los tiempos de finalización más tardíos (*Late Finish* - LF) de cada actividad realizando un recorrido inverso desde el final del proyecto, ambas utilizando el método del Camino Crítico (*CPM*) para proyectos determinísticos. Estos tiempos ES y LF, junto con las duraciones de las actividades, permiten identificar la ruta crítica y las holguras de las actividades, siendo fundamentales para el análisis cuantitativo de riesgos de cronograma.

organize:

Reorganiza las actividades del proyecto de acuerdo a las relaciones de precedencia dadas, de tal forma que si la actividad *i* precede a la actividad *j*, entonces *i* tendrá un valor menor que *j* en el nuevo orden. Por lo tanto, devuelve tanto la nueva matriz de precedencia ordenada como los nuevos índices/valores para las actividades ya organizadas en ese orden.

rebuild:

Tiene como objetivo construir una única matriz de precedencia del tipo 1 (el tipo más restrictivo - *Finish-to-Start*) a partir de cualquier combinación de tipos de precedencia (1, 2, 3 o 4) proporcionada entre las actividades del proyecto. Existen cuatro tipos de relaciones de precedencia:

Tipo 1 (Finalizar-para-Iniciar): La actividad *j* no puede iniciar hasta que la actividad *i* haya terminado. Tipo 2 (Iniciar-para-Iniciar): La actividad *j* no puede iniciar hasta que la actividad *i* haya iniciado. Tipo 3 (Finalizar-para-Finalizar): La actividad *j* no puede terminar hasta que la actividad *i* haya terminado. Tipo 4 (Iniciar-para-Finalizar): La actividad *j* no puede terminar hasta que la actividad *i* haya iniciado.

La función *rebuild* convierte todas estas precedencias en los tipos 1, 2, 3 y 4 a una única matriz de precedencia tipo 1, que es la más restrictiva. Esta matriz puede ser utilizada como entrada para construir el *Precedence Diagramming Method (PDM)*, que es una representación gráfica de las relaciones de precedencia entre las actividades, mostrando específicamente las relaciones *Finish-to-Start*.

schedule.pert:

Calcula el cronograma de un proyecto determinístico utilizando la técnica *PERT* (Técnica de Evaluación y Revisión de Programas). La función calcula la duración total del proyecto, las holguras y el cronograma de cada actividad, mostrando los tiempos de inicio y término.

levelling.resources:

Resuelve el problema de nivelación de recursos en proyectos determinísticos. El objetivo es encontrar un cronograma de ejecución de las actividades que permita consumir los recursos de la forma más uniforme posible a lo largo del tiempo. El nivelamiento de recursos toma en cuenta que, para ejecutar las actividades en los plazos estimados, es necesario asignar cierto nivel de recursos. Sin embargo, el consumo temporal de esos recursos debe ser lo más uniforme posible, evitando picos de alta demanda. La función busca un cronograma de ejecución de las actividades que respete las precedencias y duraciones, de forma que el consumo de recursos quede lo más nivelado posible a lo largo del proyecto. Esto se logra minimizando la variación del uso de recursos entre los períodos. La salida es una matriz de solución que contiene el cronograma de las actividades que nivela el consumo de recursos.

resource.allocation:

Esta función calcula el cronograma del proyecto de forma que el consumo de recursos no exceda el máximo disponible por período de tiempo. El problema de asignación de recursos toma en cuenta que, para que las actividades se ejecuten en el tiempo estimado, se debe utilizar cierto nivel de recursos. El problema es que el nivel de recursos disponibles en cada período es limitado. El objetivo es obtener el tiempo mínimo y un cronograma para la ejecución del proyecto, teniendo en cuenta esta nueva restricción. La función recibe los datos de entrada y calcula el cronograma de menor duración total que respete los límites de recursos. La salida es una matriz de solución que contiene el cronograma optimizado que respeta los límites de recursos. Puede ser utilizada junto con la función *levelling.resources* para optimizar la asignación de recursos.

Mce:

Implementa el método de Aceleración de Costo Mínimo (*Minimum Cost Expediting - MCE*) para acelerar un proyecto al costo mínimo posible. Recibe como entrada la duración original de cada actividad, las duraciones mínimas permitidas después de la aceleración, la matriz de precedencias y los costos de aceleración por unidad de tiempo. Calcula la ruta crítica inicial con las duraciones originales usando el algoritmo *CPM* e identifica las actividades críticas en ella. Para cada actividad crítica, calcula el costo de acelerarla una unidad multiplicando su costo de aceleración por la reducción en la duración del proyecto. Ordena las actividades críticas por costo de aceleración por unidad de reducción, de menor a mayor. Itera acelerando las actividades una por una en ese orden, actualizando la ruta crítica y las duraciones tras cada aceleración. Continúa hasta alcanzar la duración objetivo o agotar las actividades críticas. Devuelve una matriz de solución con las duraciones actualizadas después de la aceleración.

Las funciones *stochastic.pert* y *delay.stochastic.pert* son centrales para modelar, simular y analizar los riesgos de cronograma derivados de las incertidumbres de duración en proyectos estocásticos.

delay.stochastic.pert:

Calcula el retraso de un proyecto estocástico una vez que se ha completado y distribuye este retraso entre las actividades del proyecto utilizando diferentes reglas de asignación. La función primero estima la distribución de la duración total del proyecto mediante el muestreo de las distribuciones de duración de las actividades individuales y siguiendo las restricciones de precedencia. Luego, compara la duración

observada del proyecto (basada en las duraciones observadas de las actividades) con la duración máxima permitida (basada en el percentil/delta) para determinar si hay un retraso.

Cuando se detecta un retraso, utiliza diferentes reglas para distribuir el retraso total del proyecto entre las actividades individuales, considerando factores como la contribución marginal al retraso, los retrasos independientes y los retrasos observados.

stochastic.pert:

Realiza análisis estocásticos de proyectos en el formato *PERT* (*Program Evaluation and Review Technique*), permitiendo considerar las incertidumbres en las duraciones de las actividades, utilizando diferentes distribuciones de probabilidad.

Los principales argumentos de la función incluyen las matrices de precedencia entre las actividades, un vector que indica la distribución de probabilidad a ser utilizada para cada actividad, una matriz que contiene los parámetros de las distribuciones de probabilidad para cada actividad, un vector que indica las actividades para las cuales los tiempos iniciales y finales deben ser graficados, un valor entre 0 y 1 que indica el percentil deseado para la duración del proyecto y el número de iteraciones a ser realizadas para calcular la duración promedio del proyecto.

Utiliza un enfoque analítico basado en las distribuciones de probabilidad especificadas para calcular la duración promedio estimada del proyecto, el índice de criticidad de las actividades, indicando la probabilidad de que cada actividad pertenezca a la ruta crítica del proyecto, la densidad de los tiempos iniciales y finales de las actividades especificadas, proporcionando información sobre la variabilidad y la incertidumbre asociadas al cronograma del proyecto, y el percentil de la duración del proyecto, calculado en base a las distribuciones de probabilidad de las actividades. También ofrece recursos de visualización, como gráficos de densidad de probabilidad para los tiempos iniciales y finales de las actividades seleccionadas.

La función *stochastic.pert* es la principal herramienta del paquete para el análisis de proyectos estocásticos con duraciones inciertas y se puede utilizar junto con otras funcionalidades del paquete para optimizar recursos y realizar un análisis de riesgos global. Se enfoca principalmente en el análisis estocástico de proyectos y no incluye funcionalidades completas para la gestión de proyectos, como la creación de diagramas de Gantt, el análisis de valor ganado o la generación de informes de progreso.

3.2. Aplicación a un ejemplo práctico

A continuación, se programarán funcionalidades de gestión de riesgos en proyectos. Se aplicarán ejemplos de proyectos estocásticos con duraciones de actividades no deterministas como base.

3.2.1. Gestión de riesgos de cronograma

Ejemplo:

El ejemplo a ser seguido es de uno de los modelos disponible en el *software* Tamara. *El proyecto consiste en la construcción de 3 torres dividido en 23 actividades y con el suministro de datos como fechas de inicio y finalización de las actividades, la duración en días, el porcentaje de realización y sus actividades predecesoras y sucesoras.*

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

Cuadro 3.1: Actividades del proyecto

Se inicia con la creación de una matriz de precedencia para almacenar las relaciones de precedencia entre las actividades del proyecto. Posteriormente, se crean las variables aleatorias que representan las duraciones de las actividades del proyecto. Cada actividad se modela como una variable aleatoria, generada a partir de una distribución de probabilidad específica con sus respectivos parámetros. Al generar valores aleatorios a partir de estas distribuciones, podemos crear diferentes escenarios de duración para cada actividad. Después de la simulación de la duración de cada actividad a lo largo de 10.000 iteraciones, se obtiene para la duración del proyecto:

```
Average time of the project = 56.799217
Percentile duration of the project = 69.206418
```

Figura 3.1: Duración media

Su duración media, simulada en todas las iteraciones, es de 56,79 días, con una duración en el percentil 95 de 69,20 días. A través del paquete *ProjectManagement*, se generan las representaciones de un histograma de la duración del proyecto, una curva de densidad de probabilidad de la duración del proyecto y la densidad de probabilidad de los tiempos de inicio más tempranos para actividades específicas.

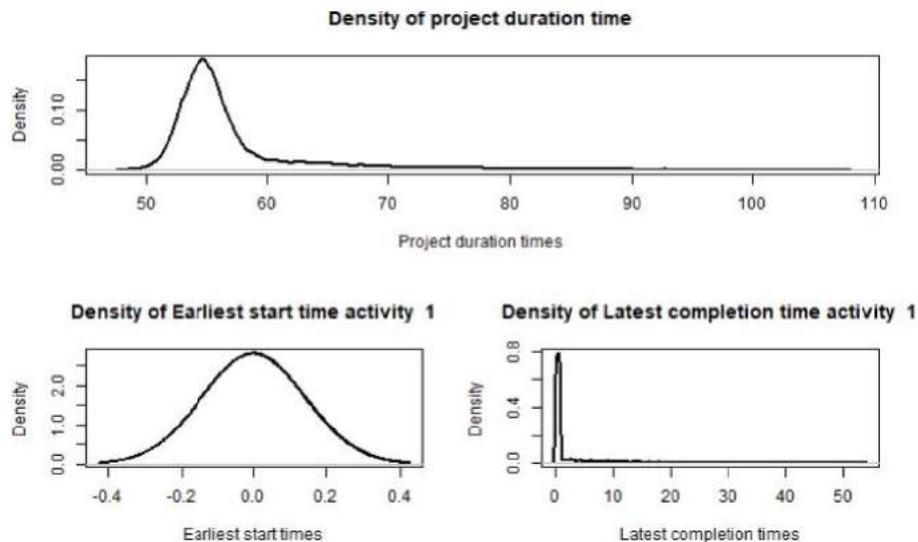


Figura 3.2: Representaciones de la duración por la *package* ProjectManagement- Densidad de probabilidad

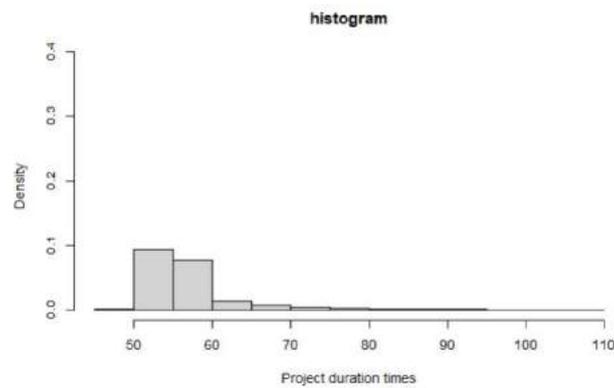


Figura 3.3: Representaciones de la duración por la *package* ProjectManagement- Histograma

En cuanto a la duración del proyecto, se pueden contemplar los siguientes resultados de la estadística descriptiva:

```
vars      n mean sd median trimmed mad  min   max range skew kurtosis  se
X1       1 10000 56.8 5.8 55.15  55.6 2.32 48.44 106.93 58.49 2.84   9.89 0.06
```

Figura 3.4: Estadística descriptiva

La media de la duración del proyecto es de 56,8 días, con una desviación estándar (sd) de 5,8, una mediana de 55,15, un valor mínimo de 48,44 y un valor máximo de 107,17. La duración del proyecto presenta una asimetría positiva (2,75) y una curtosis elevada (9,59), lo que indica una distribución con una cola más pesada a la derecha y una mayor concentración alrededor de la media en comparación con una distribución normal.

A continuación, se calculan los percentiles de la duración del proyecto, tal como se hizo en Tamara.

▲	Percentile	Values
1%	0.01	50.792975
5%	0.05	52.008179
15%	0.15	53.104914
25%	0.25	53.793704
35%	0.35	54.359447
45%	0.45	54.882850
50%	0.50	55.152914
65%	0.65	56.095381
75%	0.75	57.084440
85%	0.85	59.616872
95%	0.95	69.206418
99%	0.99	81.823749

Figura 3.5: Percentiles de la duración del proyecto

El percentil 5 y el percentil 95 de la duración del proyecto se calculan por separado y se genera un histograma de la duración del proyecto que muestra la distribución de las duraciones simuladas del

proyecto. Las líneas verticales punteadas indican los percentiles 5 y 95, donde se encuentra el 90 % de las distribuciones.

El gráfico de la FDA empírica (curva S) muestra los principales percentiles de la duración del proyecto. Por ejemplo, existe un 85 % de probabilidad de que el proyecto se complete en aproximadamente 60 días, según el punto donde la línea del percentil 85 cruza la curva.

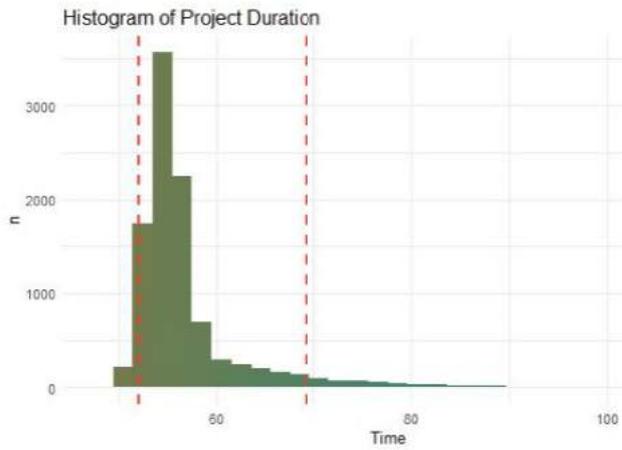


Figura 3.6: Histograma: Duración del proyecto

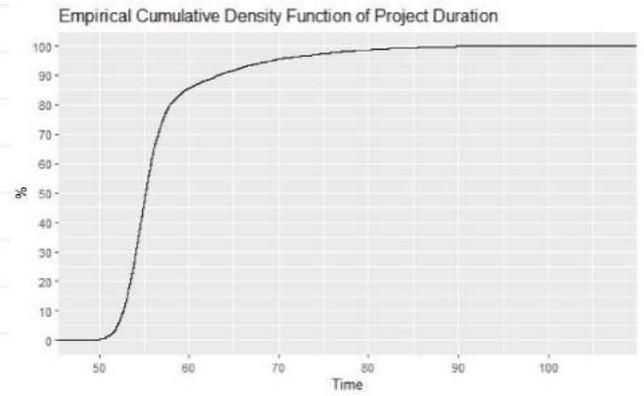


Figura 3.7: Curva S: Duración del proyecto

El gráfico de Pareto proporcionado presenta una visión clara de la frecuencia de las actividades del proyecto y su impacto acumulado. Están representadas la frecuencia de las actividades, ordenadas de la más frecuente a la menos frecuente y el porcentaje acumulado.

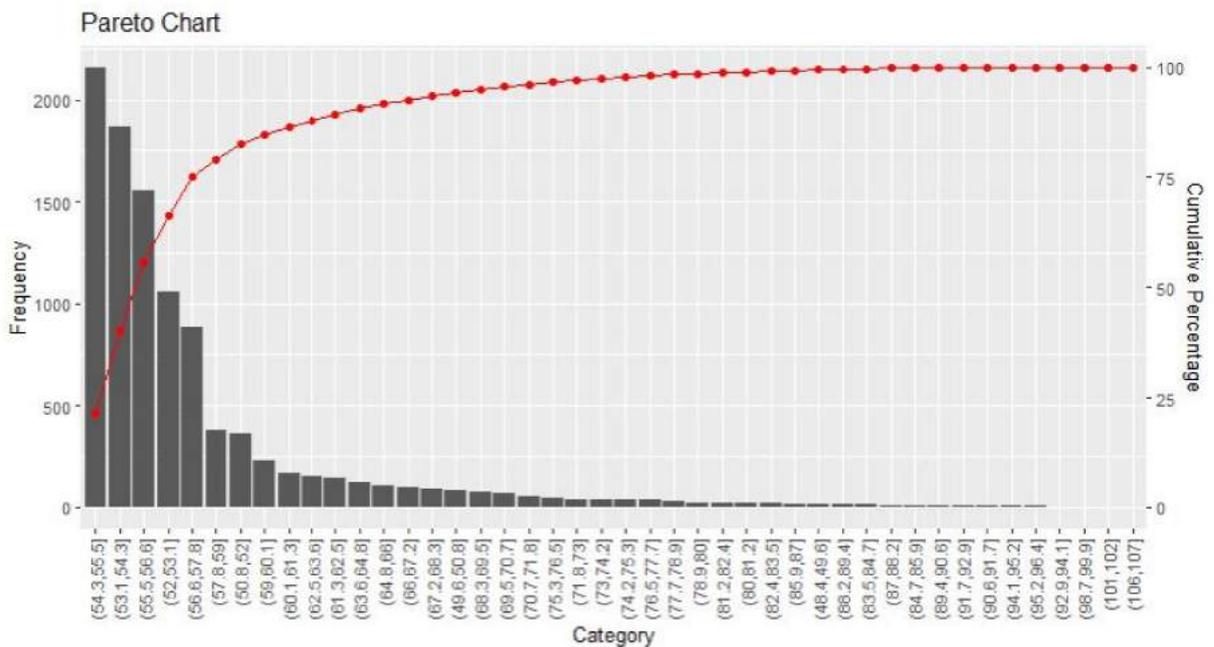


Figura 3.8: Gráfico de Pareto: Duración del proyecto

Duraciones de las tareas

Como resultados del análisis de las duraciones de las tareas individuales obtenidas a través de la simulación, se tiene un diagrama de caja (boxplot) de las duraciones de las tareas que muestra la distribución de las duraciones simuladas para cada actividad individual. Esto ayuda a identificar qué actividades tienen más variabilidad y riesgo.

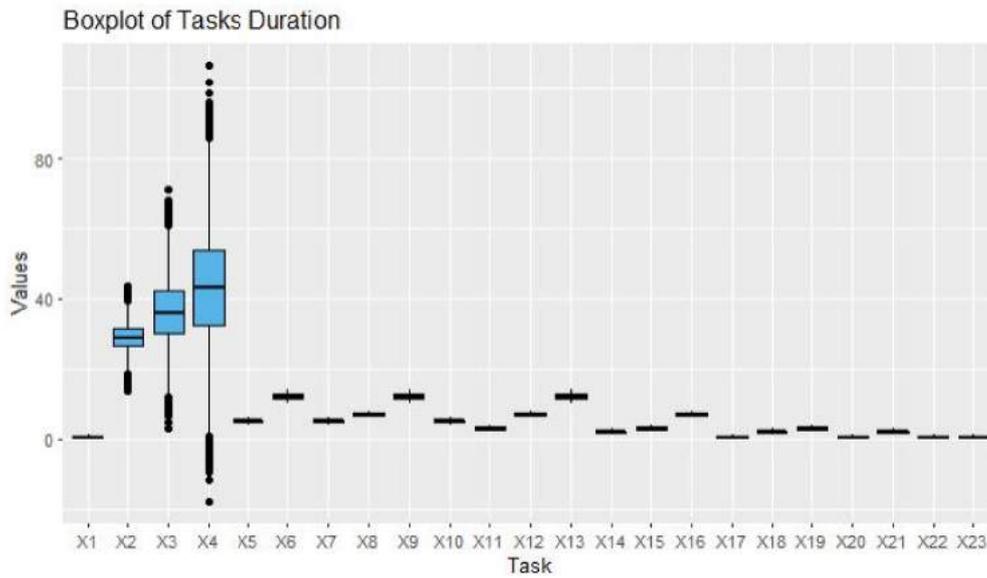


Figura 3.9: Box plot: Duración de las tareas

Análisis descriptivo de las duraciones de las actividades

Para un análisis más detallado, se calculan los percentiles de las duraciones de las tareas. Esto incluye la creación de una tabla de deciles que muestra la duración simulada del proyecto general y de cada actividad, lo que proporciona una visión más detallada de las distribuciones de duración.

	1%	5%	15%	25%	35%	45%	50%	65%	75%	85%	95%	99%
X1	0.0102895781	0.052951917	0.15664259	0.25829281	0.36143661	0.46124965	0.51066667	0.65511307	0.75569682	0.84877050	0.95013895	0.99055973
X2	19.7243352866	22.481432988	24.98840624	26.35888755	27.48892836	28.53568252	29.00806911	30.57351906	31.66258976	33.16022751	35.69774706	38.38851848
X3	15.6656924952	21.430384609	26.68549603	30.02858770	32.73327887	34.99315690	36.11208619	39.61362779	42.25010198	45.49677227	50.69271261	56.65583892
X4	6.5226369360	16.363567773	26.64534833	32.44682196	36.91357758	40.89219135	42.90343121	48.95831296	53.65408137	59.36912416	69.19719021	81.82374912
X5	4.1531494743	4.327214903	4.55591485	4.71154973	4.84470355	4.95838040	5.00607804	5.17262538	5.29745635	5.46615975	5.68062320	5.85207064
X6	10.2747479774	10.635542464	11.08656824	11.39445151	11.66459030	11.90027805	12.00550263	12.33190781	12.58846996	12.91012044	13.35881453	13.73286963
X7	4.1385743476	4.324461955	4.55621031	4.70881615	4.84734626	4.95967706	5.00910301	5.15755023	5.29500584	5.45065914	5.68834428	5.86869189
X8	6.1525740736	6.319542483	6.55867055	6.71413059	6.84021596	6.95385875	7.00461711	7.15919011	7.29273818	7.45482587	7.67845798	7.85417765
X9	10.2885777782	10.637542989	11.10032386	11.40439550	11.66949325	11.88179398	11.99462039	12.32455000	12.58503854	12.91554864	13.37243548	13.72520189
X10	4.1332171835	4.318742426	4.55185471	4.71198690	4.83686953	4.95282829	5.00482844	5.17482839	5.30561521	5.45882936	5.69372555	5.86683538
X11	2.1538540052	2.316324398	2.54866161	2.70807548	2.83472904	2.94870148	3.00062104	3.15082388	3.29506773	3.45441983	3.68686779	3.86522465
X12	6.1519267664	6.322813291	6.56186322	6.71635258	6.83481041	6.94820899	7.00150555	7.15903760	7.29705669	7.45598092	7.68217940	7.86182246
X13	10.3022611901	10.646644613	11.10803220	11.42737196	11.69202613	11.91019238	12.00864716	12.31487625	12.57358996	12.90464845	13.38307322	13.72592203
X14	1.1359545612	1.317411170	1.54990945	1.70570587	1.83571944	1.94599344	1.99576620	2.15746896	2.29062195	2.44826726	2.66944040	2.84989006
X15	2.1480397365	2.320722270	2.55112078	2.71055262	2.83640043	2.94702801	3.00008301	3.15518460	3.28473761	3.44006484	3.68978605	3.87128391
X16	6.1349378246	6.315686731	6.53691589	6.69625706	6.82983000	6.94134461	6.99731651	7.15145384	7.29348766	7.45351400	7.67919668	7.86016529
X17	0.0084937284	0.049815731	0.14748376	0.24713814	0.34680727	0.44625064	0.49855440	0.63922750	0.74347116	0.84590860	0.94796649	0.99006909
X18	1.1478433069	1.312427946	1.54983265	1.70656107	1.83986585	1.95206931	2.00071231	2.15462288	2.29484248	2.45569529	2.67159344	2.85186335
X19	2.1469980618	2.317390622	2.53994819	2.69694612	2.82982220	2.94329257	2.99433122	3.15182350	3.28144951	3.44026073	3.68346031	3.85952114
X20	0.0124437135	0.050762219	0.15237799	0.25122262	0.35037098	0.44729114	0.49876117	0.64501837	0.74606675	0.85027930	0.95166618	0.99238470
X21	1.1328736029	1.313688787	1.54577253	1.70380240	1.83159981	1.94496031	1.99480409	2.15514633	2.28531084	2.44567219	2.68066656	2.86146014
X22	0.0102915944	0.048268596	0.14877826	0.25186773	0.35036929	0.45018090	0.49919960	0.64651693	0.74677164	0.84743792	0.94858109	0.98986378
X23	0.0102541108	0.048477991	0.14991642	0.24885156	0.35036626	0.45568325	0.50085077	0.65137811	0.75091606	0.85181835	0.95458229	0.99141119

Figura 3.10: Tabla de deciles de las duraciones de las tareas

Para obtener una visión más completa de las características estadísticas de las tareas, se utilizan estadísticas descriptivas adicionales. Estas estadísticas incluyen otras estadísticas descriptivas, como la mediana (median), la media recortada (trimmed), la desviación absoluta mediana (mad), el rango (range), el sesgo (skew), la curtosis (kurtosis) y el error estándar de la media (se).

	vars	mean	sd	median	trimmed	mad	min	max	range	skew	kurtosis	se
X1	X1	0.50569030	0.28735309	0.51066687	0.50687132	0.36830257	0.000252400758	0.99978010	0.99952770	-0.03164119670	-1.188123297	0.0028735309
X2	X2	29.04108729	3.99119731	29.00806911	29.03303991	3.93195385	13.550690800639	43.50524843	29.95455763	0.01303346822	0.070390327	0.0399119731
X3	X3	36.12887529	8.93876442	36.11208619	36.13692143	9.06184597	3.157469716185	71.16652777	68.00905805	0.00360856008	-0.077281749	0.0893876442
X4	X4	43.00029716	15.96988971	42.90343121	42.95810356	15.76192159	-17.865907379157	106.92975295	124.79566033	0.04754016870	0.054260592	0.1596988971
X5	X5	5.00703214	0.40658036	5.00607804	5.00744568	0.43496291	4.011514048065	5.97718185	1.96566780	-0.01095705733	-0.625903818	0.004058036
X6	X6	11.99844941	0.81802342	12.00550263	11.99805595	0.88477578	10.015345274921	13.95314603	3.93780075	0.00324749261	-0.614357553	0.0081802342
X7	X7	5.00559656	0.40640380	5.00910301	5.00578131	0.43402683	4.009612601134	5.99084763	1.98123503	-0.00988725890	-0.566473402	0.0040540380
X8	X8	7.00409261	0.40599184	7.00461711	7.00457046	0.42900197	6.025783732685	7.99005427	1.96427053	-0.00480780953	-0.598155086	0.0040599184
X9	X9	11.99631687	0.81739359	11.99462039	11.99480751	0.87513066	10.047822106306	13.97265172	3.92482961	0.01768127870	-0.609281770	0.0081739359
X10	X10	5.00648747	0.41162884	5.00482844	5.00680935	0.44020934	4.007647500488	5.98355956	1.97591206	-0.00712745359	-0.602324345	0.0041162884
X11	X11	3.00037050	0.40842272	3.00062104	2.99944527	0.43531295	2.004263732714	3.98860016	1.98433643	0.02091424798	-0.598925504	0.0040842272
X12	X12	7.00383515	0.40679016	7.00150555	7.00403489	0.43055824	6.014963341487	7.98506550	1.97010216	0.00403339720	-0.600036804	0.0040679016
X13	X13	12.00731037	0.81042185	12.00864716	12.00528297	0.84872347	10.034849043217	13.97510398	3.94025493	0.01585550605	-0.555264641	0.0081042185
X14	X14	1.99669951	0.40543913	1.99576620	1.99697971	0.43501373	1.018290737881	2.97268712	1.95439638	-0.00279351933	-0.587028173	0.0040543913
X15	X15	2.99814923	0.40549474	3.00008301	2.99719149	0.42516145	2.010777718131	3.99427045	1.98349273	0.01695093990	-0.556121345	0.0040549474
X16	X16	6.99552300	0.41114927	6.99731651	6.99452790	0.44151897	6.007937680149	7.98867938	1.98074170	0.01570483363	-0.628708322	0.0041114927
X17	X17	0.49619824	0.28763821	0.49855440	0.49556851	0.36766392	0.000069572590	0.99999332	0.99992374	0.01225940033	-1.185709158	0.0028763821
X18	X18	2.00069361	0.40682235	2.00071231	2.00196090	0.43608729	1.016250717807	2.97925104	1.96300032	-0.01805629344	-0.613804783	0.0040682235
X19	X19	2.99278603	0.40644278	2.99433122	2.99162235	0.43344015	2.014577726723	3.99381625	1.97923853	0.02154654985	-0.593021563	0.0040644278
X20	X20	0.49949830	0.28804854	0.49876117	0.49890123	0.36696628	0.000162323471	0.99985957	0.99969724	0.01527289645	-1.189066139	0.0028804854
X21	X21	1.99458588	0.40744066	1.99480409	1.99459071	0.43081815	1.005377548847	2.97912980	1.97375225	0.00249011656	-0.567258415	0.0040744066
X22	X22	0.49919402	0.28776773	0.49919960	0.49943142	0.36693326	0.000134086236	0.99975235	0.99961826	-0.00474510524	-1.186719260	0.0028776773
X23	X23	0.50098728	0.29005759	0.50085077	0.50079333	0.37247167	0.000073826872	0.99998579	0.99991196	0.00072864867	-1.199280442	0.0029005759

Figura 3.11: Estadísticas descriptivas adicionales

Además del análisis descriptivo numérico, se presenta una visualización gráfica de las duraciones promedio de las tareas mediante un gráfico de barras, que permite una comprensión visual y comparativa de las duraciones.

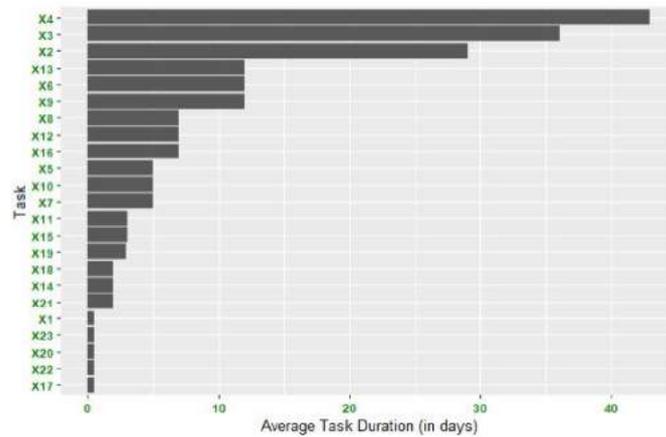


Figura 3.12: Promedio: Duración de las tareas (día)

A fin de proporcionar una visión general de las duraciones de las tareas simuladas, se calcularon la media, el valor mínimo y el valor máximo de la duración para cada tarea.

	Mean	Min	Max
X1	0.50569030	0.000252400758	0.99978010
X2	29.04108729	13.550690800639	43.50524843
X3	36.12887529	3.157469716185	71.16652777
X4	43.00029716	-17.865907379157	106.92975295
X5	5.00703214	4.011514048065	5.97718185
X6	11.99844941	10.015345274921	13.95314603
X7	5.00559656	4.009612601134	5.99084763
X8	7.00409261	6.025783732685	7.99005427
X9	11.99631687	10.047822106306	13.97265172
X10	5.00648747	4.007647500488	5.98355956
X11	3.00037050	2.004263732714	3.98860016
X12	7.00383515	6.014963341487	7.98506550
X13	12.00731037	10.034849043217	13.97510398
X14	1.99669951	1.018290737881	2.97268712
X15	2.99814923	2.010777718131	3.99427045
X16	6.99552300	6.007937680149	7.98867938
X17	0.49619824	0.000069572590	0.99999332
X18	2.00069361	1.016250717807	2.97925104
X19	2.99278603	2.014577726723	3.99381625
X20	0.49949830	0.000162323471	0.99985957
X21	1.99458588	1.005377548847	2.97912980
X22	0.49919402	0.000134086236	0.99975235
X23	0.50098728	0.000073826872	0.99998579

Figura 3.13: Estadísticas descriptivas de las duraciones de las tareas simuladas

Adicionalmente, se calcularon la desviación estándar y la varianza de las duraciones de las actividades, así como el coeficiente de variación. Estas medidas proporcionan información sobre la variabilidad de las duraciones de las tareas.

	SD	Var	CoefV
X1	0.28735309	0.082571796	0.568239274
X2	3.99119731	15.929655969	0.137432778
X3	8.93876442	79.901509375	0.247413304
X4	15.96988971	255.037377286	0.371390217
X5	0.40658036	0.165307589	0.081201867
X6	0.81802342	0.669162319	0.068177428
X7	0.40640380	0.165164050	0.081189884
X8	0.40599184	0.164829377	0.057964945
X9	0.81739359	0.668132277	0.068137045
X10	0.41162884	0.169438302	0.082219089
X11	0.40842272	0.166809121	0.136124097
X12	0.40679016	0.165478236	0.058081059
X13	0.81042185	0.656783571	0.067494037
X14	0.40543913	0.164380891	0.203054657
X15	0.40549474	0.164425981	0.135248350
X16	0.41114927	0.169043723	0.058773200
X17	0.28763821	0.082735739	0.579684054
X18	0.40682235	0.165504420	0.203340653
X19	0.40644278	0.165195737	0.135807499
X20	0.28804854	0.082971959	0.576675714
X21	0.40744066	0.166007892	0.204273311
X22	0.28776773	0.082810267	0.576464705
X23	0.29005759	0.084133403	0.578971957

Figura 3.14: Medidas de variabilidad de las duraciones de las tareas simuladas

Indicadores de sensibilidad del cronograma de proyectos

Para una evaluación más detallada del impacto de las tareas en el proyecto general, se calculan varios índices, incluyendo el índice de contribución (CI), el índice de significancia (SI), el índice de sincronización de tareas (SSI) y el índice de relevancia crítica (CRI). Se presentan visualizaciones gráficas de los índices CI, CRI y SSI para proporcionar una comprensión visual y comparativa del impacto de las tareas en el proyecto.

El proceso para calcular estos índices se inicia con el cálculo de las holguras para cada tarea, que representan el tiempo que una tarea puede retrasarse sin afectar la fecha de finalización del proyecto. Esto se realiza mediante las funciones *early.time* y *last.time* del *package* ProjectManagement, que determinan los tiempos de inicio y finalización temprana y tardía de las tareas.

El índice de contribución (CI) se calcula contando la frecuencia con la que una tarea aparece en el camino crítico y dividiéndolo por el número total de simulaciones.

El índice de relevancia crítica (CRI) se calcula utilizando la función de correlación de Pearson para cada tarea en relación con la duración total del proyecto en cada simulación.

El índice de sincronización de tareas (SSI) se calcula combinando la desviación estándar de la duración de una tarea y su CI, y normalizándolo por la desviación estándar de la duración total del proyecto.

El índice de sincronización (SI) se calcula utilizando las duraciones de las tareas y sus holguras, en combinación con las duraciones del proyecto.

También se elaboró una tabla para presentar un análisis detallado de los índices de sensibilidad del cronograma del proyecto.

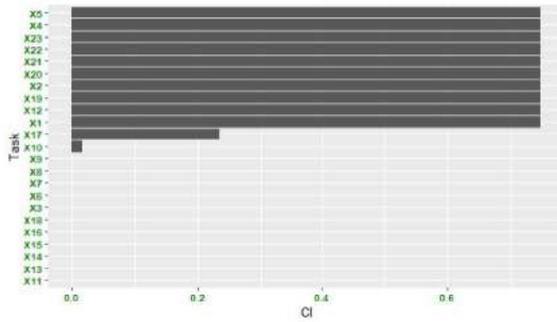


Figura 3.15: Índice de contribución (CI)

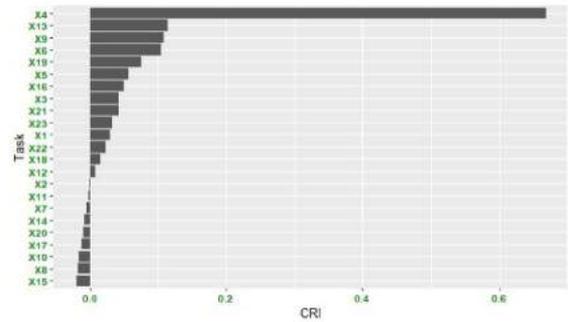


Figura 3.16: Índice de relevancia crítica (CRI)

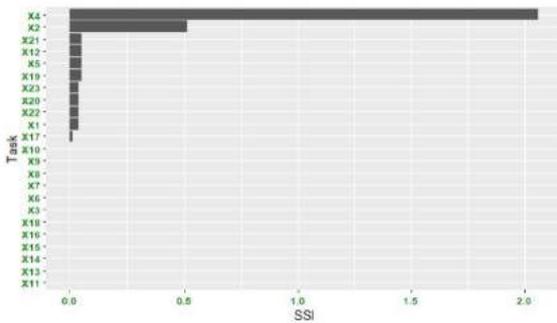


Figura 3.17: Índice de sincronización de tareas (SSI)

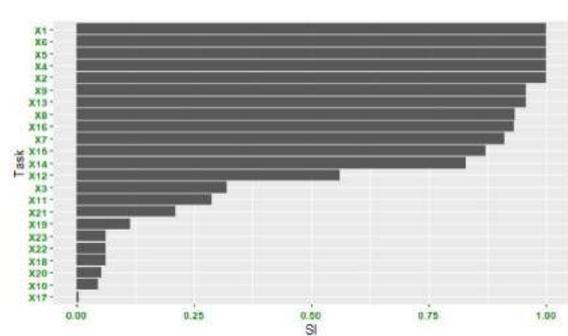


Figura 3.18: Índice de sincronización (SI)

	CI	SSI	CRI	SI
X1	0.7398	0.0372417910	0.02498450069	1.0000000000
X2	0.7398	0.5088933426	0.01384897819	1.0000000000
X3	0.0000	0.0000000000	0.02768590537	0.3200695302
X4	0.7398	2.0717274363	0.67029674761	1.0000000000
X5	0.7398	0.0527352187	0.05997422079	1.0000000000
X6	0.0000	0.0000000000	0.10851072823	1.0000000000
X7	0.0000	0.0000000000	-0.00841565757	0.9097291984
X8	0.0000	0.0000000000	0.00581251331	0.9310653297
X9	0.0000	0.0000000000	0.10386561380	0.9551473735
X10	0.0171	0.0012113231	-0.00703295253	0.0443884177
X11	0.0000	0.0000000000	-0.01000444613	0.2870852623
X12	0.7398	0.0523150054	0.00684156287	0.5595691379
X13	0.0000	0.0000000000	0.12248040773	0.9546513847
X14	0.0000	0.0000000000	-0.00195178564	0.8263513492
X15	0.0000	0.0000000000	-0.00357899306	0.8669676547
X16	0.0000	0.0000000000	0.06091621200	0.9303269068
X17	0.2431	0.0122380367	-0.01175064135	0.0044472466
X18	0.0000	0.0000000000	0.00079813069	0.0624309548
X19	0.7398	0.0522037696	0.06943231810	0.1154120069
X20	0.7398	0.0365841227	-0.01364788969	0.0530917515
X21	0.7398	0.0521883711	0.07490126660	0.2110378361
X22	0.7398	0.0369489245	0.04500471358	0.0634691861
X23	0.7398	0.0367745856	0.04413990335	0.0633368571

Figura 3.19: Tabla de los índices de sensibilidad del cronograma

Análisis de sensibilidad del proyecto

Con el propósito de comprender cómo las variaciones en la duración de las tareas individuales influyen en la duración total del proyecto, se desarrolló un gráfico de tornado basado en el cálculo de medias condicionales para evaluar la sensibilidad de cada tarea.

Este análisis se llevó a cabo utilizando las funciones *early.time* y *last.time* de la librería Project-Management para calcular los tiempos tempranos y tardíos de las tareas.

En primer lugar, se seleccionaron percentiles específicos para evaluar la variabilidad de las duraciones de las tareas. A continuación, se calcularon los valores correspondientes a los percentiles seleccionados para cada tarea, determinando así los valores de duración que corresponden a dichos percentiles. Posteriormente, se filtraron las duraciones de las tareas para seleccionar aquellas que estaban por debajo del percentil inferior y por encima del percentil superior, enfocándose en los extremos de la distribución donde la variabilidad es más significativa. Finalmente, se calcularon las medias de las duraciones filtradas para obtener los límites inferior y superior de cada tarea. En el gráfico de tornado resultante, cada barra de color representa una tarea individual, y la longitud de la barra indica la variabilidad en la duración de esa tarea. Las barras más largas indican tareas con mayor variabilidad y, por lo tanto, con mayor impacto en la duración total del proyecto. Las tareas con barras más largas son críticas porque sus variaciones pueden extender significativamente la duración del proyecto.

De esta manera, se generó el siguiente gráfico de tornado que ilustra estos resultados:

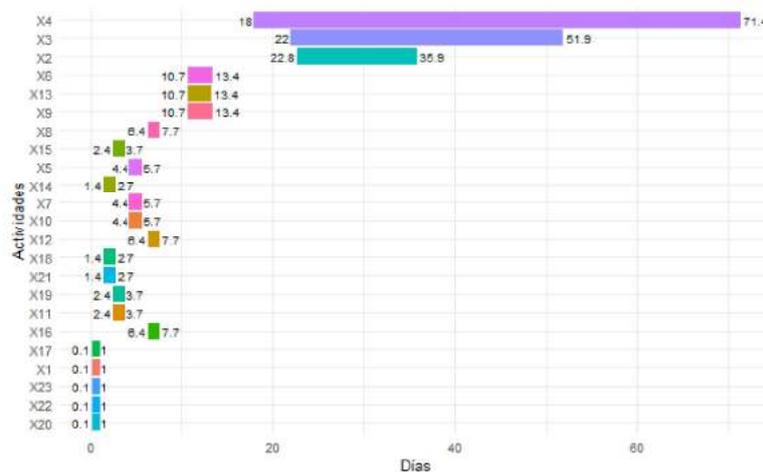


Figura 3.20: Variabilidad de las duraciones de las tareas en el proyecto

Análisis de sensibilidad ajustado del proyecto

Para comprender de manera más precisa cómo las variaciones en la duración de las tareas individuales afectan la duración total del proyecto, se desarrolló un gráfico de tornado ajustado. Este gráfico ajusta los resultados para reflejar un percentil específico de la duración total del proyecto, proporcionando una visión detallada del impacto de cada tarea.

El análisis se llevó a cabo utilizando las funciones *early.time* y *last.time* de la librería ProjectManagement para calcular los tiempos tempranos y tardíos de las tareas.

Primero, se calcularon las medias condicionales para obtener los límites inferior y superior de cada tarea. Luego, se ajustaron estos límites en relación con el proyecto total. Posteriormente, se seleccionó un percentil específico y se ajustaron las duraciones de las tareas para reflejar este percentil. En el gráfico de tornado ajustado, la longitud de cada barra refleja la variabilidad ajustada de las tareas en el contexto del percentil seleccionado, e incluye una línea vertical que indica dicho percentil.

Las barras más largas representan tareas con mayor variabilidad ajustada, lo que indica un mayor impacto potencial en la duración total del proyecto. Las tareas con barras más cortas tienen menor variabilidad ajustada, implicando un menor impacto.

De esta manera, se generó el siguiente gráfico de tornado ajustado que ilustra estos resultados.

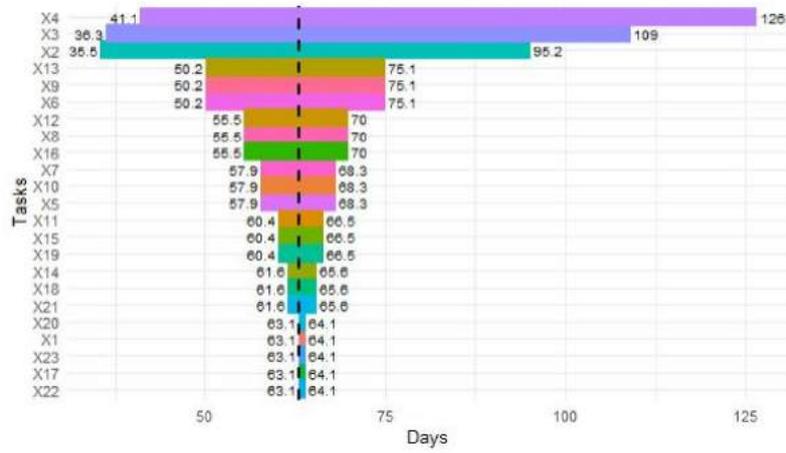


Figura 3.21: Análisis de sensibilidad ajustado del proyecto

Reserva de cronograma

Se elaboró un gráfico de reserva de cronograma que muestra las duraciones simuladas del proyecto. En el gráfico se señalaron la duración esperada del proyecto, que es la mediana de las simulaciones, y la duración en el percentil 95.

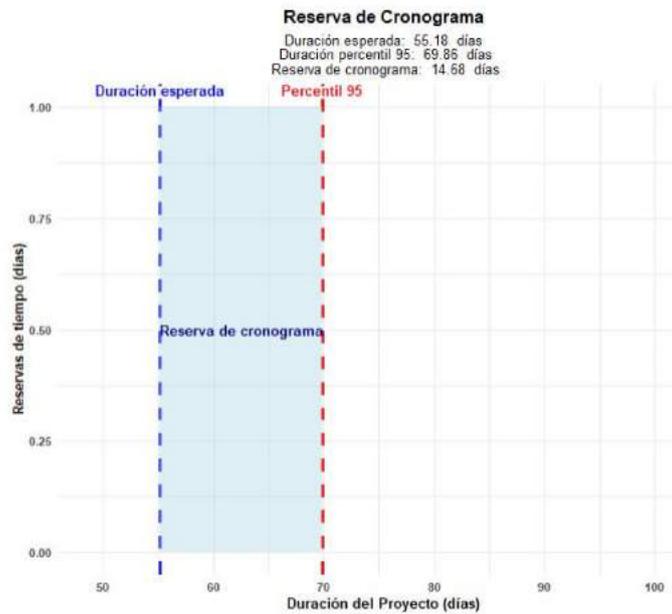


Figura 3.22: Reserva de cronograma

3.2.2. Gestión de riesgos de cronograma-costo

Ejemplo:

El proyecto está dividido en 7 actividades. Se proporcionan datos como la duración optimista, más probable y pesimista en días, el costo medio (que sigue una distribución normal), y las actividades predecesoras.

Act	Duración _o	Duración _m	Duración _p	Costo Medio	σ_C	Precedencias
A	5	7	9	1000	200	-
B	10	15	20	3000	600	A
C	20	25	30	5000	1000	B
D	8	10	12	2000	400	B
E	5	6	8	1000	200	D
F	7	10	14	3000	600	C, E
G	2	3	4	500	100	F

Cuadro 3.2: Datos del proyecto

Se inicia con la creación de una matriz de precedencia para almacenar las relaciones entre las actividades del proyecto, utilizando el paquete *ProjectManagement*. A continuación, se especifican las distribuciones de probabilidad para la duración (distribución triangular) y los costos (distribución normal) de cada actividad.

Posteriormente, se implementa la función *stochastic.pert* para la simulación estocástica del proyecto. Se generan variables uniformemente correlacionadas utilizando la matriz de correlación y se transforman estas variables en distribuciones triangulares para la duración y normales para los costos. Cada actividad se modela como una variable aleatoria, generada a partir de una distribución de probabilidad específica con sus respectivos parámetros.

Se calcula la correlación entre las duraciones y los costos de cada actividad utilizando el coeficiente de correlación de Pearson. El coeficiente de variación ajustado se calcula para cada actividad y se presenta en un dataframe y un gráfico de barras.

Tarea	CV_adj
1	0.0280608493
2	0.0134064482
3	0.0080002051
4	0.0201882653
5	0.0316272991
6	0.0201230838
7	0.0674649622

Figura 3.23: Tabla del coeficiente de variación ajustado

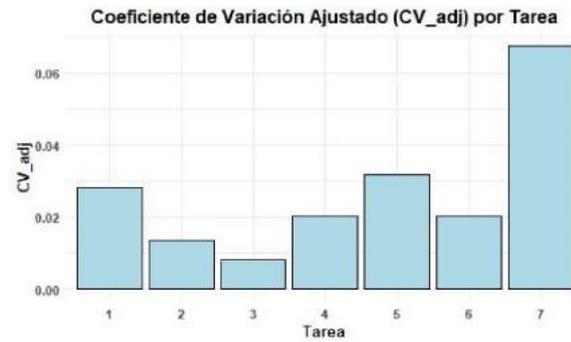


Figura 3.24: Histograma del coeficiente de variación ajustado

Análisis de la duración del proyecto

Se procede a realizar un análisis estadístico de la duración del proyecto que incluye un histograma de las duraciones simuladas del proyecto, así como estadísticas descriptivas como la media, mediana y percentiles. También se genera una función de densidad acumulada empírica y un diagrama de Pareto.

```
vars      n mean  sd median trimmed mad  min  max range skew kurtosis  se
X1      1 1000 59.97 6.11  59.87  59.94 6.58 44.68 75.81 31.13 0.04   -0.52 0.19
```

Figura 3.25: Estadísticas descriptivas para la duración del proyecto

Percentile	Values
1%	47.008027
5%	50.075424
15%	53.339758
25%	55.424765
35%	57.453072
45%	59.048246
50%	59.869534
65%	62.534559
75%	64.277674
85%	66.545028
95%	70.223611
99%	73.276320

Figura 3.26: Percentiles de la duración del proyecto

Se generan un histograma, una curva S y un diagrama de Pareto para las duraciones simuladas.

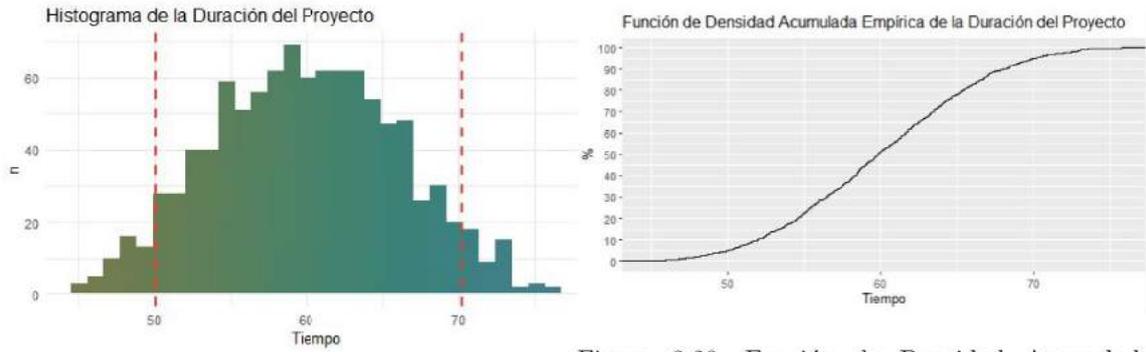


Figura 3.27: Histograma de la duración

Figura 3.28: Función de Densidad Acumulada Empírica de la duración del proyecto

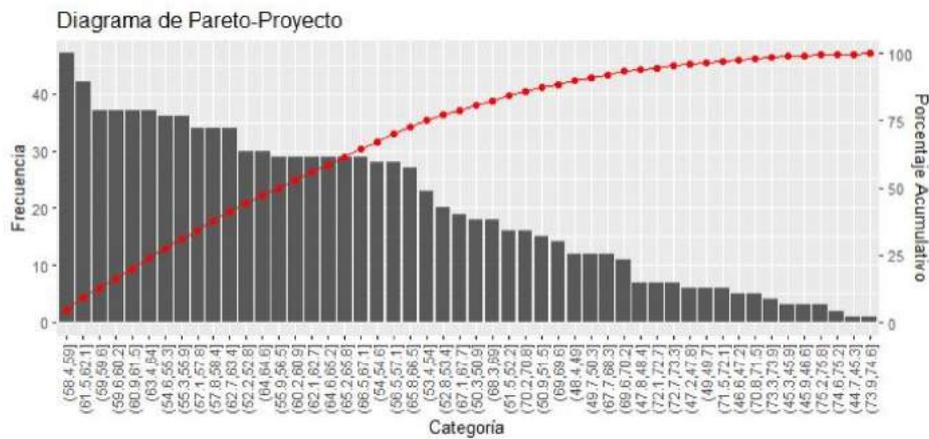


Figura 3.29: Pareto para la duración del proyecto

Análisis de la duración de las Tareas

Se generó un diagrama de caja para visualizar la distribución de las duraciones simuladas de cada tarea.

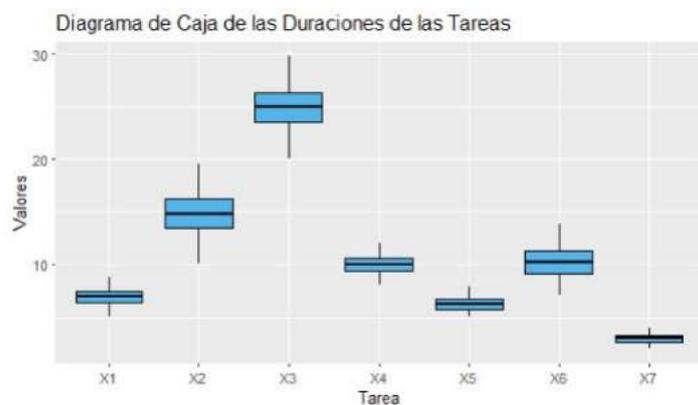


Figura 3.30: Boxplot de las duraciones de las tareas

Se calcularon los deciles de las duraciones de las tareas para proporcionar una visión más detallada de la distribución de los tiempos de cada tarea.

	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7
1%	5.3119246	10.568936	20.833185	8.2445227	5.1709191	7.3985706	2.1575559
5%	5.6280960	11.577371	21.446105	8.6430531	5.3820097	7.9968068	2.3100089
15%	6.0975091	12.722398	22.642958	9.0894604	5.6723365	8.6540537	2.5395379
25%	6.3867255	13.502296	23.480927	9.3572202	5.8259263	9.1642852	2.6947218
35%	6.6538473	14.038034	24.053472	9.5994021	6.0047720	9.5459403	2.8082406
45%	6.8713001	14.564276	24.651846	9.8702411	6.1625817	10.0162300	2.9198318
50%	6.9687233	14.827396	24.956898	9.9490572	6.2411565	10.1902444	2.9746181
65%	7.2579954	15.675994	25.709236	10.3056028	6.5225248	10.8336486	3.1306391
75%	7.5069526	16.257294	26.297075	10.5288361	6.7230252	11.3301843	3.2807530
85%	7.8185579	17.054217	27.120289	10.8702827	6.9810694	11.8556436	3.4450900
95%	8.2971508	18.275579	28.215485	11.3269012	7.3965964	12.8056918	3.6742653
99%	8.6835211	19.243557	29.018154	11.7265480	7.7560165	13.4399281	3.8505721

Figura 3.31: Tabla de las duraciones de las tareas

Se generaron estadísticas descriptivas de las duraciones de las tareas.

vars	mean	sd	median	trimmed	mad	min	max	range	skew	kurtosis	se
X1	6.9622176	0.79392464	6.9687233	6.9602181	0.82881383	5.0657850	8.8382403	3.7724553	0.0240655914	-0.52828713	0.025106102
X2	14.8747110	1.99919884	14.8273961	14.8618882	2.01076999	10.0846448	19.6304583	9.5458136	0.0494370790	-0.48312350	0.063220218
X3	24.8902097	2.01914462	24.9568978	24.8905011	2.08089699	20.0929385	29.7499405	9.6570020	-0.0035789935	-0.60520200	0.063850959
X4	9.9594249	0.80897288	9.9490572	9.9549047	0.86476390	8.0425843	11.9761263	3.9335420	0.0486436477	-0.59123384	0.025581969
X5	6.3024185	0.61260829	6.2411565	6.2773660	0.65649455	5.0463349	7.9234210	2.8770860	0.3369711878	-0.50810396	0.019372375
X6	10.2593926	1.45842054	10.1902444	10.2289801	1.61396454	7.1497330	13.8730145	6.7232815	0.1586047187	-0.66725333	0.046119307
X7	2.9807528	0.40767618	2.9746181	2.9792428	0.43241079	2.0444198	3.9708971	1.9264774	0.0479597554	-0.61555082	0.012891853

Figura 3.32: Estadísticas descriptivas de las duraciones de las tareas

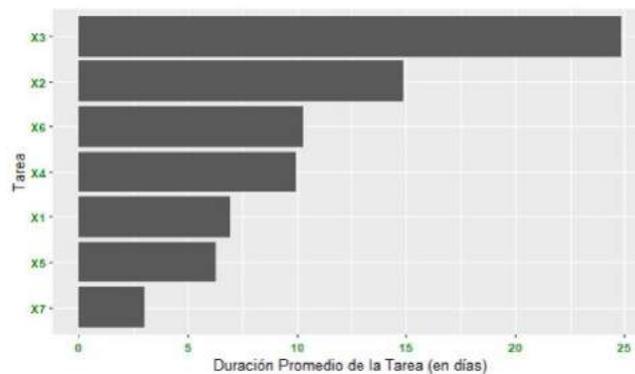


Figura 3.33: Duración promedio de las tareas

Análisis de costos del proyecto

Similar al análisis de duración, se presenta un histograma de los costos simulados del proyecto y se calculan estadísticas descriptivas. Además, se genera una función de densidad acumulada empírica y un diagrama de Pareto para los costos.

Se calcularon los percentiles de los costos del proyecto para ofrecer una visión más detallada de la distribución de los costos simulados.

```

vars  n    mean    sd    median    trimmed    mad    min    max    range    skew    kurtosis
X1    1 1000 15332.88 2813.55 15354.35 15333.09 2891.79 5226.26 24611.74 19385.48 -0.02    0.06
      se
X1    88.97
    
```

Figura 3.34: Estadísticas descriptivas - costos

Percentile	Values
1%	0.01 8712.5367
5%	0.05 10899.5680
15%	0.15 12336.0375
25%	0.25 13406.5086
35%	0.35 14228.8771
45%	0.45 14988.7282
50%	0.50 15354.3544
65%	0.65 16446.5974
75%	0.75 17309.0331
85%	0.85 18126.5462
95%	0.95 19888.5838
99%	0.99 21803.7881

Figura 3.35: Percentiles de los costos del proyecto

Se generó un histograma, una función de densidad acumulada empírica y un diagrama de Pareto para los costos del proyecto.

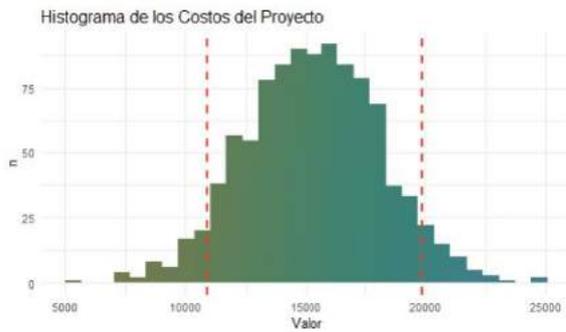


Figura 3.36: Histograma de los costos del proyecto

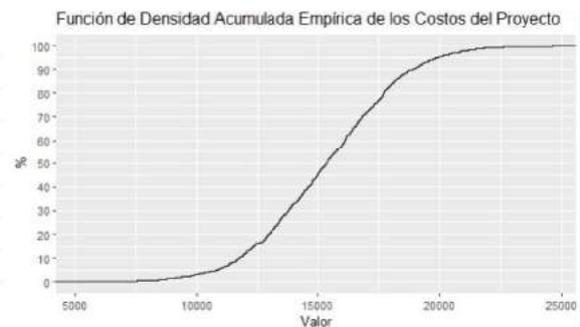


Figura 3.37: FDA empírica- costos

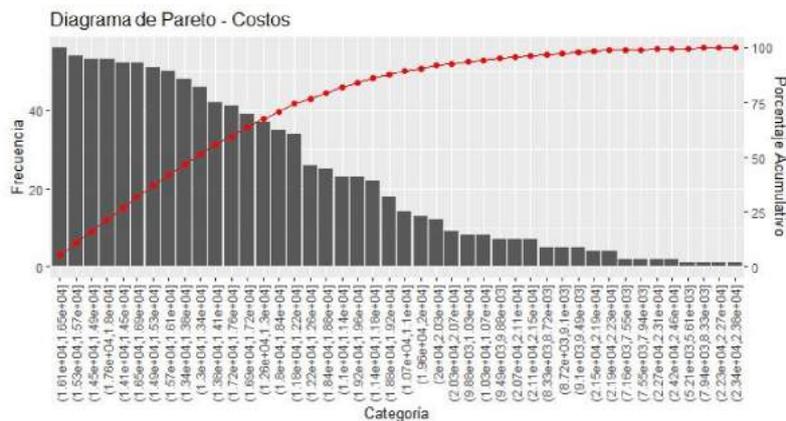


Figura 3.38: Diagrama de Pareto- costos

Análisis de sensibilidad del proyecto - cronograma

Después de calcular los rangos de duraciones del proyecto, que se utilizarán para construir el gráfico de tornado, se ha generado el gráfico que muestra la variabilidad de las duraciones de las tareas individuales en relación con la duración total del proyecto.



Figura 3.39: Variabilidad de las duraciones de las tareas

Análisis de sensibilidad ajustado del proyecto - cronograma Para proporcionar una visión más detallada, se ajusta el análisis de sensibilidad en función de la duración total del proyecto.



Figura 3.40: Análisis de sensibilidad ajustado para las duraciones

Análisis de sensibilidad del proyecto - costos

Después de calcular los rangos de costos del proyecto, que serán utilizados para construir el gráfico tornado, se ha construido el gráfico que muestra la variabilidad de los costos de las tareas individuales en relación con el costo total del proyecto.

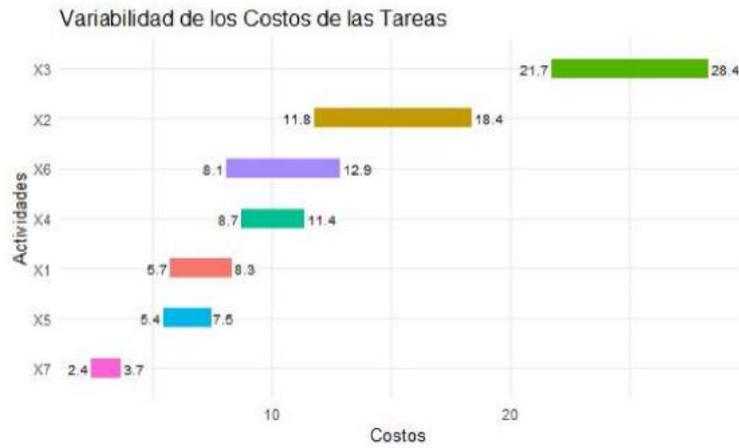


Figura 3.41: Variabilidad de las duraciones de las tareas

Análisis de sensibilidad ajustado del proyecto - costos: El gráfico tornado ajustado se construye para mostrar cómo las variaciones relativas en los costos de las tareas individuales afectan el costo total del proyecto.



Figura 3.42: Análisis de sensibilidad ajustado para los costos

Reserva de cronograma y costos

Se calcularon las reservas para los costos y el cronograma del proyecto. La reserva de costos se determinó como la diferencia entre el costo esperado y el costo en el percentil 95. De manera similar, la reserva de cronograma se calculó como la diferencia entre la duración esperada del proyecto y la duración en el percentil 95.

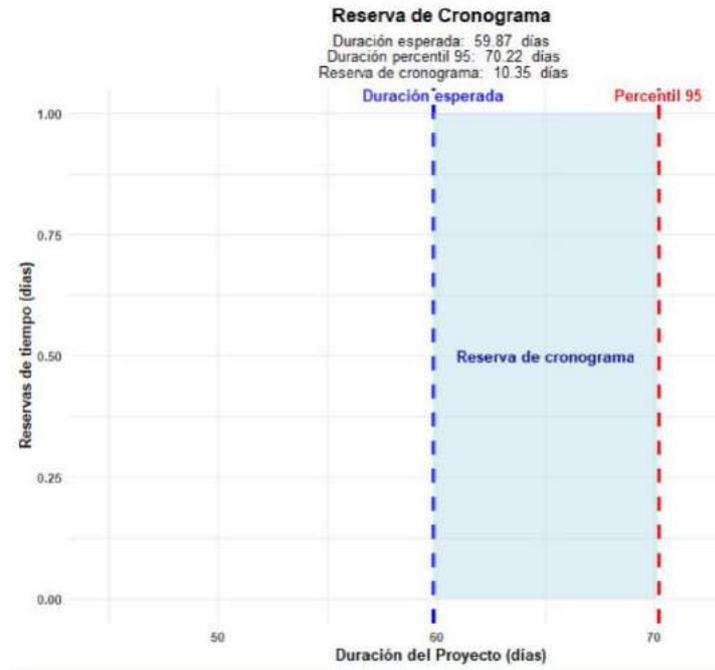


Figura 3.43: Reserva de cronograma

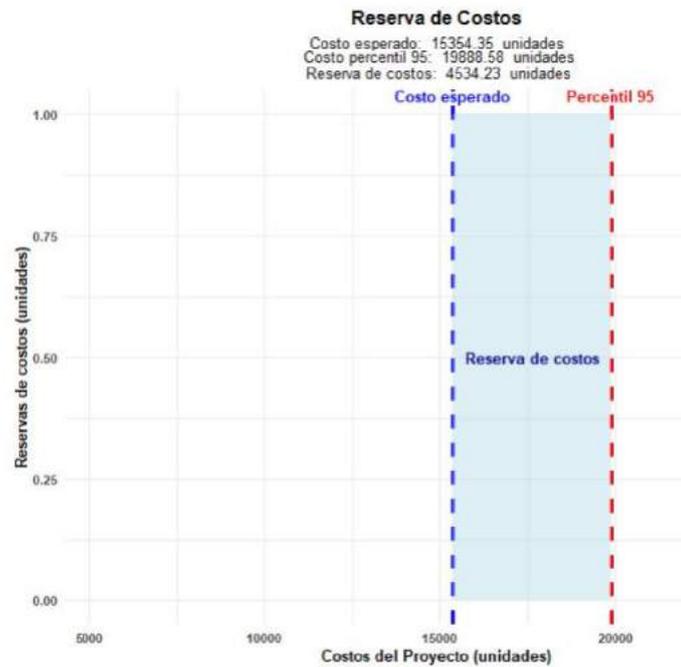


Figura 3.44: Reserva de costos

El *Earned Value Management*

Ejemplo:

Proyecto de 12 semanas con un presupuesto total al finalizar (BAC) de \$ 25200. El proyecto está en su séptima semana y el control será realizado al iniciar la octava semana. Hay, por lo tanto, los datos

sobre el presupuesto previsto (*PV*), el importe real gastado hasta la séptima semana (*AC*) y el valor ganado (*EV*) representando lo que se ha realizado por tarea hasta el momento de control en términos porcentuales por semana.

WBS	Task Name	Wk 1	Wk 2	Wk 3	Wk 4	Wk 5	Wk 6	Wk 7	Wk 8	Wk 9	Wk 10	Wk 11	Wk 12
1.1	Task 1	0.15	0.50	0.75	0.90	1.00	1.00	1.00					
1.2	Task 2		0.25	0.30	0.50	0.60	0.75	0.80					
1.3	Task 3			0.15	0.30	0.50	0.60	0.70					
1.4	Task 4					0.25	0.55	0.75					
1.5	Task 5						0.25	0.40					
1.6	Task 6							0.30					

Cuadro 3.3: Datos *Planned Value*

WBS	Task Name	Wk 1	Wk 2	Wk 3	Wk 4	Wk 5	Wk 6	Wk 7	Wk 8	Wk 9	Wk 10	Wk 11	Wk 12
1.1	Task 1	800.00	250.00	1500.00									
1.2	Task 2		900.00	700.00	1200.00	1700.00							
1.3	Task 3			300.00	300.00	1250.00	1500.00						
1.4	Task 4			100.00	500.00	900.00	700.00	400.00					
1.5	Task 5					400.00	600.00	500.00					
1.6	Task 6												

Cuadro 3.4: Datos *Actual Cost*

WBS	Task Name	Wk 1	Wk 2	Wk 3	Wk 4	Wk 5	Wk 6	Wk 7	Wk 8	Wk 9	Wk 10	Wk 11	Wk 12
1.1	Task 1	0.15	0.50	0.75	0.90	1.00	1.00	1.00					
1.2	Task 2		0.25	0.30	0.50	0.60	0.75	0.80					
1.3	Task 3			0.15	0.30	0.50	0.60	0.70					
1.4	Task 4					0.25	0.55	0.75					
1.5	Task 5						0.25	0.40					
1.6	Task 6							0.30					

Cuadro 3.5: Datos *Earned Value*

Para comenzar será necesario introducir los datos que definen el problema para elaborar la *Performance Measurement Baseline* (PMB) que posibilitará visualizar la *work breakdown structure* WBS con las tareas por semana, el *Total Budget Cost* (TBC), total presupuestado por tarea y el *Budget at completion* (BAC).

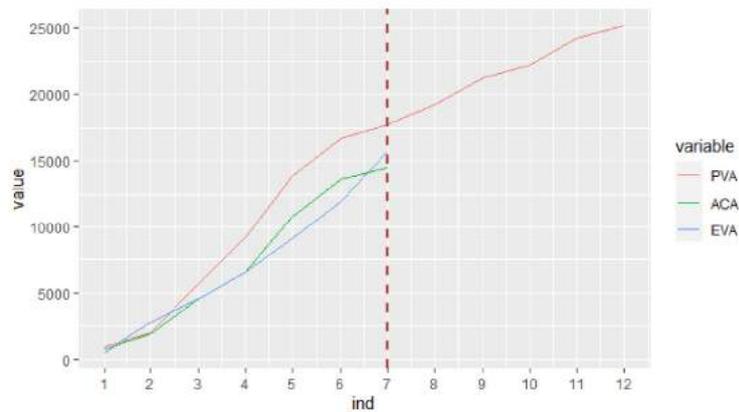
	WBS	Task Name	Budget	Wk 1	Wk 2	Wk 3	Wk 4	Wk 5	Wk 6	Wk 7	Wk 8	Wk 9	Wk 10	Wk 11	Wk 12
1	1.1	Task 1	3500	1000	500	2000	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
2	1.2	Task 2	4200	NA	500	800	900	2000	NA						
3	1.3	Task 3	4500	NA	NA	700	2000	1000	800	NA	NA	NA	NA	NA	NA
4	1.4	Task 4	3300	NA	NA	200	600	1000	1500	NA	NA	NA	NA	NA	NA
5	1.5	Task 5	3000	NA	NA	NA	NA	700	500	1000	800	NA	NA	NA	NA
6	1.6	Task 6	6700	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	700	2000	1000	2000	1000
7	Total		25200	1000	1000	3700	3500	4700	2800	1000	1500	2000	1000	2000	1000
8	Acumulado			1000	2000	5700	9200	13900	16700	17700	19200	21200	22200	24200	25200

Figura 3.45: *Performance Measurement Baseline*

Es posible visualizar que la división de trabajo considerada es la tarea y el período de tiempo es la semana. El *Total Budget Cost* (TBC) es el total presupuestado por tarea y para cada período de tiempo, la suma de todas las actividades que constituye el valor planificado para ese período.

Durante el proyecto se obtendrán EV y AC que constituirán el gráfico y la tabla como se muestra a continuación.

	PVA	ACA	EVA
Wk 1	1000	800	525
Wk 2	2000	1950	2800
Wk 3	5700	4550	4560
Wk 4	9200	6550	6600
Wk 5	13900	10800	9095
Wk 6	16700	13600	11915
Wk 7	17700	14500	15695
Wk 8	19200	NA	NA
Wk 9	21200	NA	NA
Wk 10	22200	NA	NA
Wk 11	24200	NA	NA
Wk 12	25200	NA	NA

Figura 3.46: *Tabla de magnitudes acumuladas*Figura 3.47: *Gráfico magnitudes acumuladas*

Se nota que la columna EV no cambió valores al presentar el EV acumulado, esto se debe a que la forma en que se presentaba el EV ya era el acumulado, las demás variables no. De un total, que corresponde a 25200 para este proyecto, ya se han gastado 14500 y el valor ganado ha sido de 15695 al final de la séptima semana. Para facilitar, también se calcularon todos los valores acumulados de las varianzas y demás índices que compondrán el análisis. Los resultados se pueden ver en la siguiente tabla.

	ind	PV	AC	EV	PVA	ACA	EVA	CV	CPI	SV	SPI	EAC	ETC	VAC	TCPI	DP	IPE
Wk 1	1	1000	800	525	1000	800	525	-275	0.65625000	-475	0.52500000	38400.000	37600.0000	-13200.000000	0.65625000	1.52380952	0.59062500
Wk 2	2	1000	1150	2800	2000	1950	2800	850	1.43589744	800	1.40000000	17550.000	15600.0000	7650.000000	1.43589744	0.69642857	1.41794672
Wk 3	3	3700	2600	4560	5700	4550	4560	10	1.00219780	-1140	0.80000000	25144.737	20594.7368	55.263158	1.00219780	0.99780702	0.90109690
Wk 4	4	3500	2000	6600	9200	6550	6600	50	1.00763359	-2600	0.71739130	25009.091	18459.0909	190.909091	1.00763359	0.99242424	0.86251245
Wk 5	5	4700	4230	9095	13900	10800	9095	-1705	0.84212963	-4805	0.65431655	29924.134	19124.1341	-4724.134140	0.84212963	1.18746564	0.74822309
Wk 6	6	2800	2800	11915	16700	13600	11915	-1685	0.87610294	-4785	0.71347305	28763.743	15163.7432	-3563.743181	0.87610294	1.14141838	0.79478800
Wk 7	7	1000	900	15695	17700	14500	15695	1195	1.08241379	-2005	0.88672316	23261.300	8781.2998	1918.700223	1.08241379	0.92386110	0.98456648
Wk 8	8	1500	NA	NA	19200	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Wk 9	9	2000	NA	NA	21200	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Wk 10	10	1000	NA	NA	22200	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Wk 11	11	2000	NA	NA	24200	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Wk 12	12	1000	NA	NA	25200	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA

Figura 3.48: *Tabla de magnitudes acumuladas, varianzas e índices.*

Se crean gráficos y tablas para visualizar las métricas de desempeño. Estos incluyen:

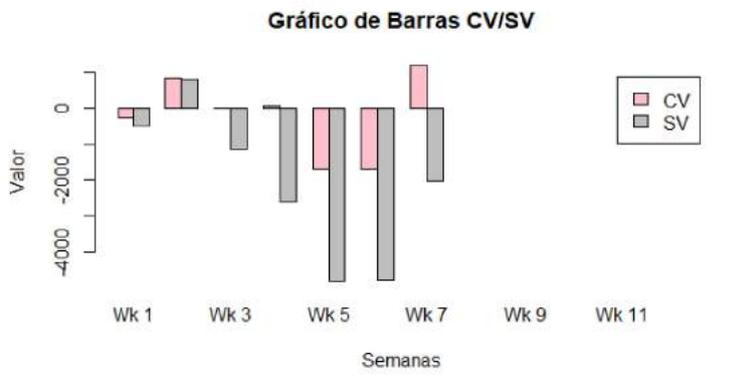


Figura 3.49: *Gráfico de barras CV/SV*

Se destaca que en la primera, quinta y sexta semana, el proyecto presentó costos por encima de lo planificado, ya que presentan CV negativo. Cuando se trata de tiempo, la segunda semana fue la única que presentó tiempo empleado por debajo de lo planeado.

Para CPI y SPI, la referencia es la línea de 1, con valores más bajos que representan retraso para SPI y costo por encima de lo planificado para CPI.

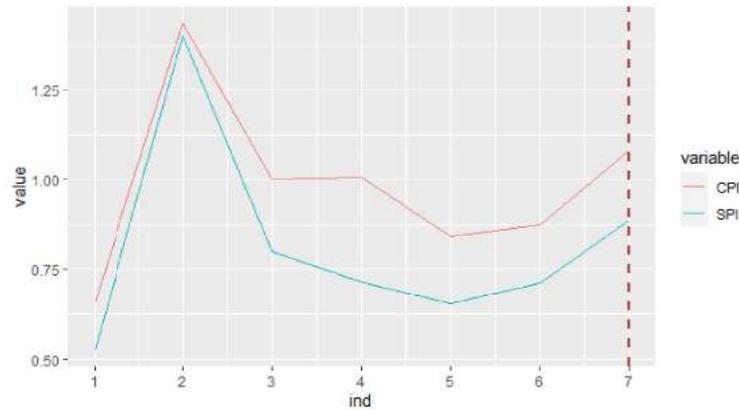


Figura 3.50: Gráfico SPI y CPI acumulados

El gráfico *Bull's eye* crea cuadrantes del estado del proyecto en términos de SPI x CPI con los puntos convergiendo al centro del gráfico.

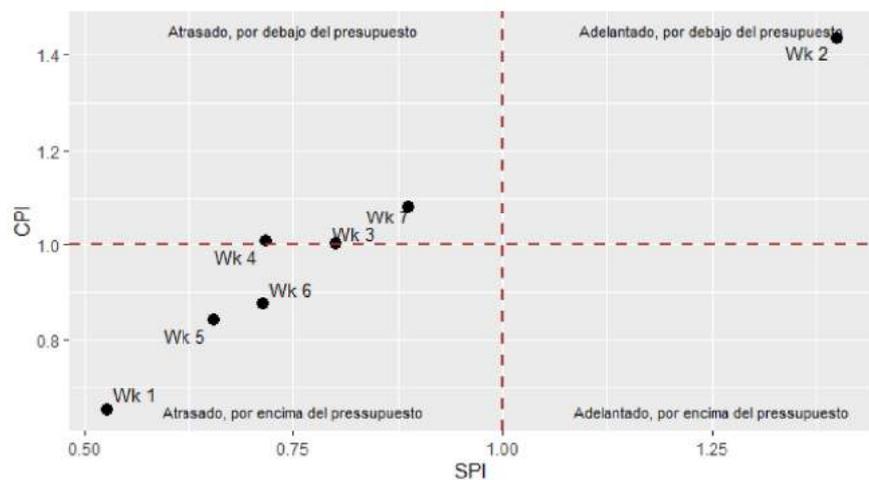


Figura 3.51: Gráfico Bull's Eye SPIxCPI

Para obtener indicadores EVM en forma de distribución de posibilidades, utilizamos un tratamiento estocástico de las variables tiempo y coste, utilizando la simulación Monte Carlo. El número de simulaciones fue de 10000, en octava semana. Las probabilidades óptimas y peores fueron los criterios definidos para los límites de la distribución, siendo una mejora del 10% del tiempo previsto y un retraso del 20% del tiempo previsto. Por lo tanto, serán generadas 3 distribuciones triangulares basadas en la misma suposición, PV. Entonces, se buscará el PV de la octava semana como el escenario más probable en 1500, el escenario alcista en 1350 y el escenario bajista en 1800 para simular 1000 distribuciones triangulares.

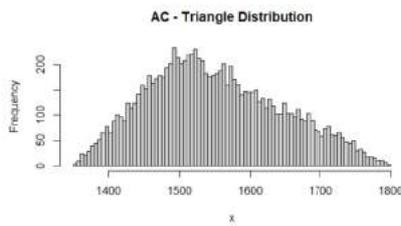


Figura 3.52: AC Distribución

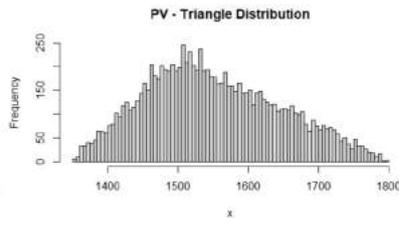


Figura 3.53: PV Distribución

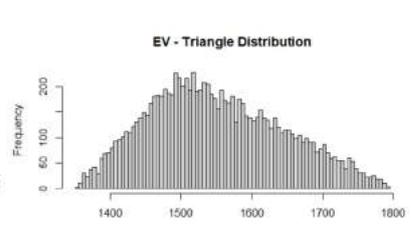


Figura 3.54: EV Distribución

Los resultados de la simulación se visualizan mediante histogramas y funciones de distribución acumulada empírica (ECDF), las cuales permiten evaluar la probabilidad de distintos niveles de desempeño del proyecto. A partir de estos resultados, se calcularán los mismos indicadores para los datos simulados. En primer lugar, se presentarán los histogramas de los valores simulados de CPI y SPI. La línea vertical en los histogramas representa el umbral crítico que señala el riesgo para el proyecto, de acuerdo con las particularidades de cada indicador.

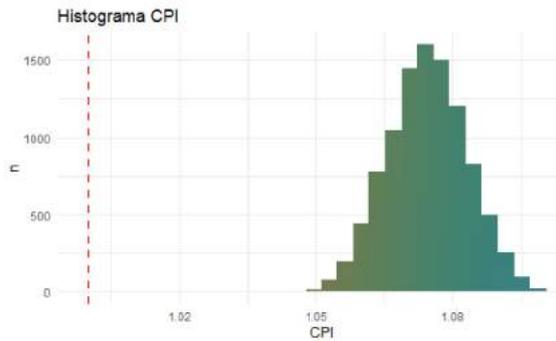


Figura 3.55: Histograma CPI- Simulación

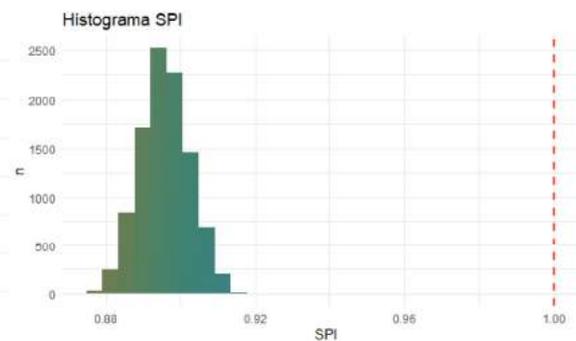


Figura 3.56: Histograma SPI- Simulación

El CPI calculado está por encima del límite impuesto, lo que indica un buen avance del proyecto en términos de costo. Por otro lado, el SPI debajo del límite muestra cómo está progresando el proyecto en relación con el tiempo. Posteriormente, se plotarán las funciones de densidad acumulada empíricas, curva S.

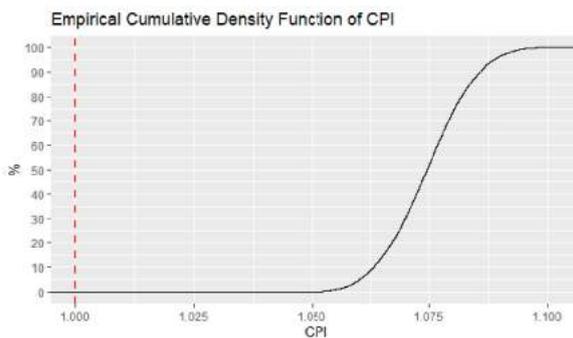


Figura 3.57: Curva S CPI

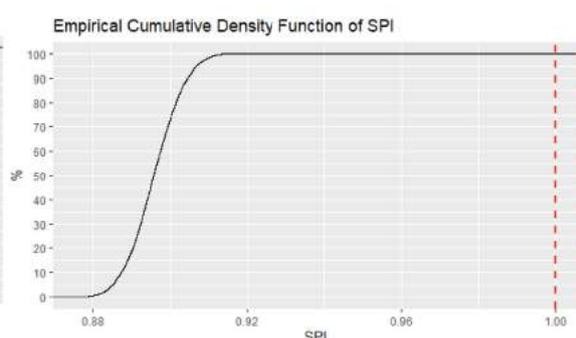


Figura 3.58: Curva S SPI

La línea vertical importa para saber cuándo se intercepta con ella, pero no hay intercepción, lo que

significa que el proyecto no está en riesgo. Las tablas que son las ilustraciones por decil del histograma, siguen a continuación:

Percentile	Values
0%	1.0463764
10%	1.0631494
20%	1.0671053
30%	1.0699496
40%	1.0723180
50%	1.0745617
60%	1.0766762
70%	1.0790520
80%	1.0816143
90%	1.0857515
100%	1.1017904

Figura 3.59: Percentil CPI

Percentile	Values
0%	0.87592576
10%	0.88735080
20%	0.89026336
30%	0.89235514
40%	0.89408925
50%	0.89577814
60%	0.89746113
70%	0.89933480
80%	0.90158198
90%	0.90453546
100%	0.91630425

Figura 3.60: Percentil SPI

Posteriormente, se elaborarán los histogramas de las distribuciones.

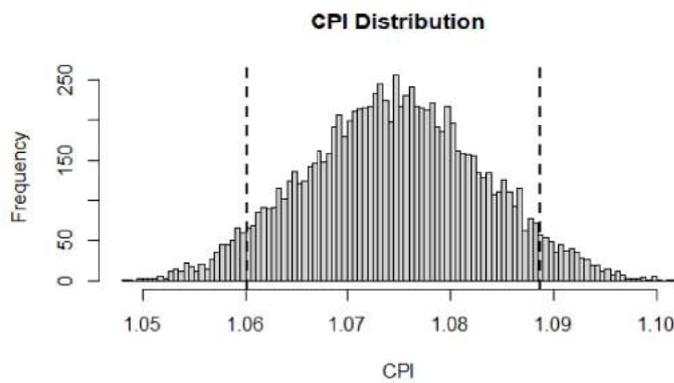


Figura 3.61: Distribución CPI

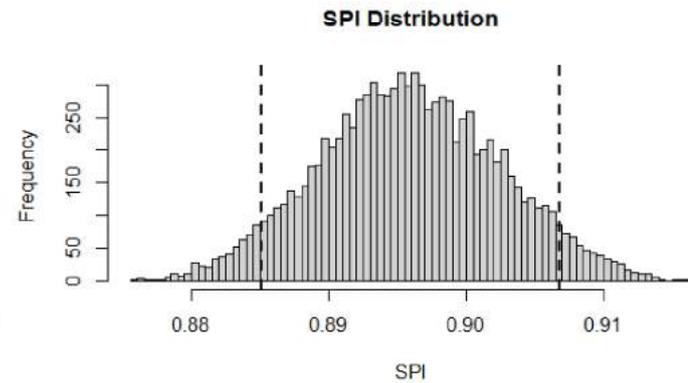


Figura 3.62: Distribución SPI

Finalmente, se crean dos indicadores. El primero es la desviación del presupuesto que representa el porcentaje del coste estimado a la finalización sobre el coste presupuestado (DP).

Índice DP			
Métrica	Abreviación	Descripción	Formula
Desviación del presupuesto	DP	Porcentaje del costo estimado a la finalización sobre el coste presupuestado	EAC/BAC
		Verde: En Buen camino, no hay desviación en el presupuesto	<100%
		Naranja: Presupuesto ligeramente sobrepasado	>100%
		Rojo: Presupuesto excedido por en cima del 10%	>110%

Cuadro 3.6: Métrica DP

Posteriormente, se plotarán el histograma y curva S para DP.

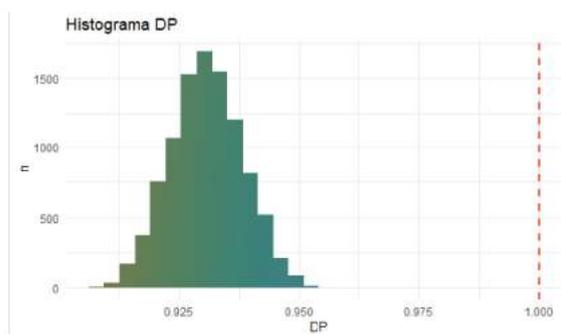


Figura 3.63: Histograma - DP

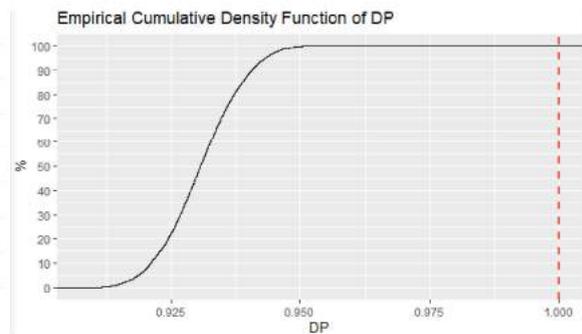


Figura 3.64: Curva S - DP

El límite está fuera de la distribución, lo que significa el buen desempeño del proyecto. A continuación serán elaborados las tablas que son las ilustraciones por decil del histograma y el histograma de las distribuciones de DP.

▲	Percentile	Values
	0%	0.0 0.90809613
	10%	0.1 0.92086917
	20%	0.2 0.92419625
	30%	0.3 0.92662254
	40%	0.4 0.92867352
	50%	0.5 0.93058682
	60%	0.6 0.93249640
	70%	0.7 0.93464670
	80%	0.8 0.93705747
	90%	0.9 0.94038327
	100%	1.0 0.95382895

Figura 3.65: Percentil - DP

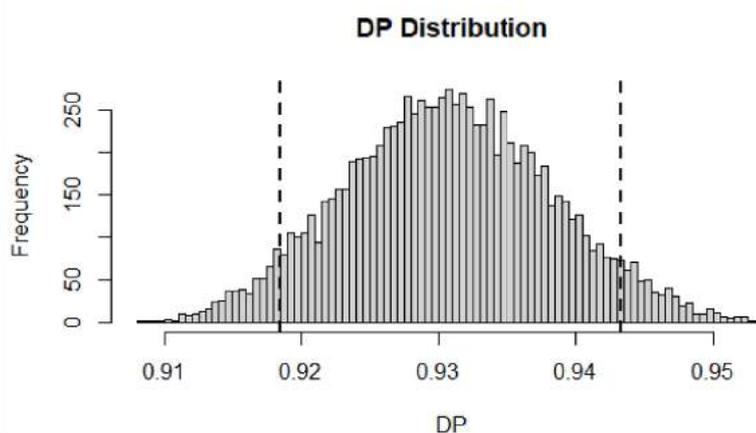


Figura 3.66: Distribución - DP

Así que 90 % de la distribución está entre 0.92 y 0.94. El segundo indicador es el estado según índice promedio de ejecución (IPE).

Índice IPE

Métrica	Abreviación	Descripción	Formula
Estado según índice promedio de ejecución	IPE	Media de CPI y SPI.	$(CPI+SPI)/2$
		Riesgo bajo: En el buen camino	>1.0
		Riesgo Medio: Ligeramente retrasado en cronograma o presupuesto	≥ 0.85
		Riesgo alto: Necesita atención inmediata	≥ 0.65
		Riesgo critico: Matar o restaurar	<0.65

Cuadro 3.7: Métrica IPE

Posteriormente, se plotarán el histograma y curva S para IPE.

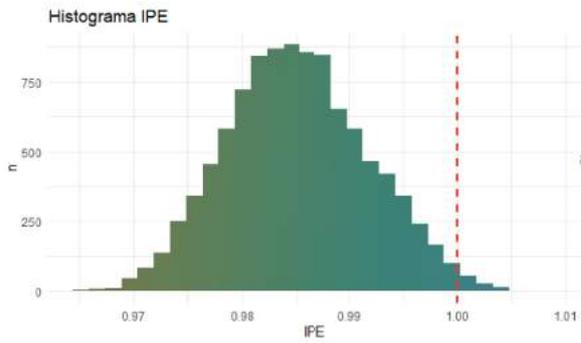


Figura 3.67: Histograma - IPE

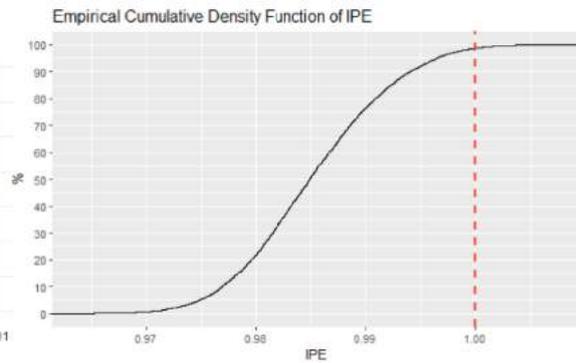


Figura 3.68: Curva S - IPE

La línea =1 está antes de la distribución finalizar, lo que indica que hay una probabilidad de que pase algo en el proyecto.

A continuación serán elaboradas las tablas que son las ilustraciones por decil del histograma y el histograma de las distribuciones de IPE.

Percentile	Values
0%	0.0 0.96553269
10%	0.1 0.97689768
20%	0.2 0.97944728
30%	0.3 0.98153224
40%	0.4 0.98334625
50%	0.5 0.98510340
60%	0.6 0.98682333
70%	0.7 0.98877362
80%	0.8 0.99103543
90%	0.9 0.99412605
100%	1.0 1.00783217

Figura 3.69: Percentil - IPE

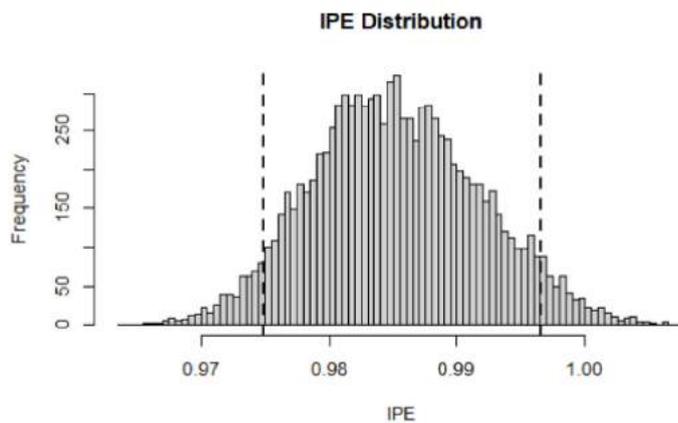


Figura 3.70: Distribución - IPE

Los 5% más bajos del IPE se ubican hasta 0.975 los más altos desde 0.997. A continuación, se muestra una representación indicativa de ambos índices.

	DP	IPE
Wk 1	1.5238	0.5906
Wk 2	0.6964	1.4179
Wk 3	0.9978	0.9011
Wk 4	0.9924	0.8625
Wk 5	1.1875	0.7482
Wk 6	1.1414	0.7948
Wk 7	0.9239	0.9846

Figura 3.71: Panel de índices

Capítulo 4

Conclusiones y trabajo futuro

El estudio ha investigado los riesgos asociados a proyectos estocásticos con duraciones no determinísticas, centrándose específicamente en los aspectos de cronograma y costos. Desde la introducción, se ha destacado la importancia de gestionar la incertidumbre y la variabilidad inherentes a los proyectos mediante procesos de planificación, identificación, análisis, implementación de respuestas y seguimiento de riesgos. Entre estos procesos, el análisis de riesgos fue exhaustivamente tratado a lo largo del trabajo, con un énfasis particular en la aplicación de la simulación *Monte Carlo* debido a su capacidad para modelar la incertidumbre y evaluar múltiples escenarios.

Se utilizó el paquete *ProjectManagement* de R, que proporcionó un conjunto de herramientas analíticas robustas y funcionales. Al replicar las capacidades de *Tamara de Vose* en R, se logró integrar una potente funcionalidad de simulación *Monte Carlo* en una plataforma accesible y flexible, demostrando claramente la adaptabilidad y potencia de las herramientas empleadas.

Para la gestión de riesgos de cronograma, se emplearon histogramas para mostrar la duración simulada, curvas de densidad de probabilidad para evaluar la distribución, diagramas de caja para visualizar la variabilidad y gráficos de Pareto para identificar la frecuencia e impacto de las actividades. Además, se utilizaron índices de sensibilidad y gráficos de tornado para analizar el impacto de las variaciones en las tareas sobre la duración total del proyecto, complementado con estadísticas descriptivas y gráficos de reserva de cronograma.

En cuanto a la gestión de riesgos de cronograma-costos, se modelaron duraciones y costos utilizando distribuciones triangulares y normales, y se aplicó la función *stochastic.pert* para simulaciones estocásticas. Se evaluó la variabilidad en los costos mediante el coeficiente de variación ajustado y se realizaron análisis descriptivos de las duraciones del proyecto. Las visualizaciones incluyeron histogramas, curvas de densidad acumulada empírica y gráficos de barras para el coeficiente de variación. Los diagramas de Pareto y las tablas de deciles proporcionaron una visión detallada de la distribución y frecuencia de las duraciones.

Algunas funcionalidades presentes en *Tamara* han sido mejoradas, como la visualización gráfica de las reservas de cronograma y costos, el añadido de diversas métricas estadísticas y el análisis de sensibilidad. El análisis de sensibilidad en *Tamara* está más alineado con el tipo de análisis tornado replicado en el código R, que utiliza expectativas condicionales para calcular y visualizar las variaciones en las duraciones de las tareas del proyecto. Este enfoque permite identificar y analizar las variaciones más críticas, proporcionando una visión detallada y matizada que complementa las funcionalidades de *Tamara*.

Además, se realizó un segundo tipo de análisis tornado en R que no está presente en *Tamara*, el cual se basa en un análisis de sensibilidad ajustado para la duración del cronograma. Este análisis calcula las variaciones relativas y ajustadas, ofreciendo una perspectiva aún más detallada y contextualizada de cómo las duraciones de las tareas pueden variar en relación con el tiempo total del proyecto. Esta capacidad adicional en R permite una comprensión más profunda de los posibles escenarios y las contingencias del proyecto, destacando la flexibilidad y potencia de las herramientas analíticas

empleadas.

Se realizó una revisión de la literatura, destacando principalmente los trabajos de Dave Vose y Mario Vanhoucke, un destacado académico y experto en el campo de la gestión de proyectos, conocido por sus importantes contribuciones, particularmente en áreas como el *Earned Value Management* (EVM). Su obra fue esencial para la elaboración de los índices de sensibilidad, los cuales no están contemplados en el PMBOK ni en los softwares evaluados en este proyecto. Además, herramientas como el *Earned Value Management* también se basaron en la literatura debido a su ausencia en el software adoptado para el estudio.

Las futuras líneas de trabajo pueden estar orientadas a la construcción de funciones para la etapa de implementación de respuestas a los riesgos y la optimización. Entre las técnicas a explorar se encuentran *Schedule Crashing*, *Fast Tracking* y *Resource Smoothing*. El paquete *ProjectManagement* de R ofrece un gran potencial para integrar estas capacidades, permitiendo así una gestión de riesgos aún más efectiva y precisa. Otra aportación para futuros trabajos sería la elaboración del *Earned Duration Management*, que, a pesar de no estar presente en ninguno de los softwares revisados, es muy importante para mejorar el seguimiento y control del desempeño del proyecto en términos de monitoreo de la duración.

Apéndice A

Códigos en R

A.1. Apéndice A

Simulación del análisis de riesgos en cronograma

```
1 # Preparamos el entorno y importamos librerías
2
3 rm(list=ls())
4
5 options(digits = 8, scipen = 100)
6
7 library(ProjectManagement)
8 library(triangle)
9 library(ggplot2)
10 library(psych)
11 library(dplyr)
12
13 prec <- matrix(0, nrow = 23, ncol = 23)
14
15 prec[1, 4] <- 1; prec[4, 5] <- 1; prec[4, 11] <- 1; prec[5, 6] <- 1; prec[5, 12] <- 1;
16 prec[6, 7] <- 1; prec[6, 13] <- 1; prec[7, 8] <- 1; prec[7, 14] <- 1; prec[8, 9] <- 1;
17 prec[9, 2] <- 1; prec[11, 12] <- 1; prec[11, 18] <- 1; prec[12, 13] <- 1; prec[12, 19]
18 <- 1;
19 prec[13, 14] <- 1; prec[13, 20] <- 1; prec[14, 15] <- 1; prec[14, 21] <- 1; prec[15,
20 16] <- 1;
21 prec[16, 2] <- 1; prec[18, 19] <- 1; prec[19, 20] <- 1; prec[20, 21] <- 1; prec[21,
22 22] <- 1;
23 prec[22, 23] <- 1; prec[23, 2] <- 1;
24
25 distribution <- c("UNIFORM", "UNIFORM", "NORMAL", rep("TRIANGLE", 5), "UNIFORM", "
26 NORMAL", rep("TRIANGLE", 5), "UNIFORM", "NORMAL", rep("TRIANGLE", 5), "UNIFORM")
27
28 values <- matrix(c(0,1,0, 0,1,0, 29,4,0, 4,6,5, 10,14,12, 6,8,7, 2,4,3, 1,3,2, 0,1,0,
29 36,9,0, 4,6,5, 10,14,12, 6,8,7, 2,4,3, 1,3,2, 0,1,0, 43,16,0, 4,6,5, 10,14,12,
30 6,8,7, 2,4,3, 1,3,2, 0,1,0), nrow = 23, ncol = 3, byrow = T)
31
32 prec3and4 <- matrix(0)
33
34 # 1.
35
36 # funcion para aplicar pert estocástico
37
38 stochastic.pert.2 <- function(prec1and2 = matrix(0), prec3and4 = matrix(0),
39 distribution, values, percentile = 0.95, plot.activities.times = NULL, compilations
40 = 10000){
```

```

34 or1 <- order(organize(prec1and2,prec3and4)$Order[,2])
35 or2 <- organize(prec1and2,prec3and4)$Order[,2]
36
37 precedence <- organize(prec1and2,prec3and4)$Precedence
38 activities <- c(1:dim(precedence)[1])
39 n <- length(activities)
40 distribution <- distribution[or2]
41
42 values <- values[or2, ]
43
44 if(is.null(plot.activities.times)==FALSE){
45   T.E<-matrix(0,nrow=compilations,ncol=length(plot.activities.times))
46   T.L<-matrix(0,nrow=compilations,ncol=length(plot.activities.times))
47 }
48
49 tiempo.computacion <- numeric(compilations)
50
51 caminos.criticos<-matrix(0,nrow=compilations,ncol=length(activities))
52
53 C<-numeric(length(activities))
54 n<-length(activities)
55 tiempo.early<-rep(0,n)
56 tiempo.last<-rep(0,n)
57 duration<-matrix(0,nrow=compilations,ncol=length(activities))
58
59 ii<-as.logical(colSums(precedence))
60 iii<-activities[ii]
61 nn<-length(iii)
62 if(nn>0){
63   prec<-matrix(0,nrow=nn,ncol=n-1)
64   for(j in 1:length(iii)){
65     prec[j,1:length(which(precedence[,iii[j]]==1))]<-which(precedence[,iii[j]]==1)
66   }
67   prec<-prec[,as.logical(colSums(prec)),drop=FALSE]
68 }
69 ii1<-as.logical(rowSums(precedence))
70 iii1<-activities[ii1]
71 nn1<-length(iii1)
72 if(nn1>0){
73   prec1<-matrix(0,nrow=length(iii1),ncol=n-1)
74
75   for(j in 1:length(iii1)){
76     prec1[j,1:length(which(precedence[iii1[j],]==1))]<-which(precedence[iii1[j],]==1)
77   }
78   prec1<-prec1[,as.logical(colSums(prec1)),drop=FALSE]
79 }
80
81 for(j in 1:length(activities)){
82   {
83     if(distribution[j]=="NORMAL"){
84       duration[,j]<-c(rnorm(compilations,values[j,1],values[j,2]))
85     }
86     else if(distribution[j]=="TRIANGLE"){
87       duration[,j]<-c(rtriangle(compilations,values[j,1],values[j,2],values[j,3]))
88     }
89     else if(distribution[j]=="EXPONENTIAL"){
90       duration[,j]<-c(rexp(compilations,values[j,1]))
91     }
92     else if(distribution[j]=="UNIFORM"){
93       duration[,j]<-c(runif(compilations,values[j,1],values[j,2]))
94     }
95     else if(distribution[j]=="BETA"){
96       duration[,j]<-c(rbeta(compilations,values[j,1],values[j,2]))
97     }

```

```

98   else if(distribution[j]=="EMPIRICAL"){
99     duration[,j]<-rnorm(compilations , sample(values[j,],size=compilations ,replace=
TRUE),density(values[j,])$bw)
100   }
101   else if(distribution[j]=="T-STUDENT"){
102     duration[,j]<-rt(compilations ,df=values[j,1],ncp=values[j,2])
103   }
104   else if(distribution[j]=="FDISTRIBUTION"){
105     duration[,j]<-rf(compilations,df1 =values[j,1],df2 =values[j,2],ncp=values[j
,3])
106   }
107   else if(distribution[j]=="CHI-SQUARED"){
108     duration[,j]<-rchisq(compilations ,df =values[j,1],ncp=values[j,2])
109   }
110   else if(distribution[j]=="GAMMA"){
111     duration[,j]<-rgamma(compilations ,shape =values[j,1],rate =values[j,2],scale=
values[j,3])
112   }
113   else if(distribution[j]=="WEIBULL"){
114     duration[,j]<-rweibull(compilations ,shape =values[j,1],scale=values[j,2])
115   }
116   else if(distribution[j]=="BINOMIAL"){
117     duration[,j]<-rbinom(compilations ,size =values[j,1],prob=values[j,2])
118   }
119   else if(distribution[j]=="POISSON"){
120     duration[,j]<-rpois(compilations ,lambda =values[j,1])
121   }
122   else if(distribution[j]=="GEOMETRIC"){
123     duration[,j]<-rgeom(compilations ,prob=values[j,1])
124   }
125   else if(distribution[j]=="HYPERGEOMETRIC"){
126     duration[,j]<-rhyper(compilations ,m=values[j,1],n=values[j,2],k=values[j,3])
127   }
128 }
129 }
130
131 for(i in 1:compilations){
132
133   if(nn>0){
134     for(j in 1:length(iii)) {
135       tiempo.early[iii[j]]=max(tiempo.early[prec[j,]]+duration[i,prec[j,]]);
136     }
137   }
138
139   tiempo.last[activities[iii]==FALSE]<-max(tiempo.early+duration[i,])
140   if(nn1>0){
141     for(j in length(iiii):1) {
142       tiempo.last[iiii[j]]=min(tiempo.last[prec1[j,]]-duration[i,prec1[j,]]);
143     }
144   }
145   if(is.null(plot.activities.times)==FALSE){
146     T.E[i,]<-tiempo.early[plot.activities.times]
147     T.L[i,]<-tiempo.last[plot.activities.times]
148   }
149   tiempo.computacion[i]<-max(tiempo.early+duration[i,])
150   caminos.criticos[i,]<-(tiempo.last-tiempo.early-duration[i,])
151
152 }
153
154 delta <- quantile(ecdf(tiempo.computacion), percentile, names = FALSE)
155
156 caminos.criticos <- round(caminos.criticos,4)
157
158 for(i in 1:length(activities)){
159   C[i]<-length(which(caminos.criticos[,i]==0))

```

```

160 }
161
162 cat("Tiempo promedio del proyecto = ", mean(tiempo.computacion), "\n")
163 cat(" ", "\n")
164 cat("Duración percentil del proyecto = ", delta, "\n")
165
166 A <- matrix(c((C[or1]/compilations)*100), ncol = length(activities), byrow = TRUE)
167 colnames(A) = c(activities)
168 rownames(A) = c("Índice de criticidad por actividad ")
169 cat(" ", "\n")
170
171 hist(tiempo.computacion, freq=F, xlab="Tiempos de duración del proyecto", main="
Histograma", ylim=c(0, max(density(tiempo.computacion)$y)+0.2))
172 {
173   if(is.null(plot.activities.times)==FALSE){
174     layout(matrix(c(1,1,2:(2*length(plot.activities.times)+1)), (length(plot.
activities.times)+1), 2, byrow = TRUE))
175     plot(density(tiempo.computacion), lwd=2, xlab="Tiempos de duración del proyecto"
, main="Densidad de tiempo de duración del proyecto")
176     for(i in 1:length(plot.activities.times)){
177       plot(density(T.E[,i]), lwd=2, xlab="Tiempos de inicio más temprano", main=
paste("Densidad de tiempo de inicio más temprano de la actividad ", plot.activities
.times[i]))
178       plot(density(T.L[,i]), lwd=2, xlab="Tiempos de finalización más tardía", main=
paste("Densidad de tiempo de finalización más tardía de la actividad ", plot.
activities.times[i]))
179     }
180   }
181   else{
182     plot(density(tiempo.computacion), lwd=2, xlab="Tiempos de duración del proyecto"
, main="Densidad de tiempo de duración del proyecto")
183   }
184 }
185 return(list(tiempo.computacion, duration, A, T.E, T.L))
186 }
187
188
189 # 2. Simulación
190
191 result <- stochastic.pert.2(prec, prec3and4, distribution, values, percentile = 0.95,
plot.activities.times = c(1), compilations = 10000)
192
193
194 #3.
195 ##### Duración del Proyecto #####
196
197 data_simul_proj <- data.frame(result[[1]])
198 colnames(data_simul_proj) <- c("Temp_proj")
199
200 print(describe(data_simul_proj$Temp_proj))
201
202 percnts <- c(1, 5, 15, 25, 35, 45, 50, 65, 75, 85, 95, 99)
203 vals_dur_proj <- quantile(data_simul_proj$Temp_proj, probs = percnts/100)
204
205 tab_dur_proj <- data.frame(Percentile = percnts/100, Valores = vals_dur_proj)
206 print(tab_dur_proj)
207
208 proj_dur_05 <- quantile(data_simul_proj$Temp_proj, probs = 0.05)
209 proj_dur_95 <- quantile(data_simul_proj$Temp_proj, probs = 0.95)
210
211 p <- ggplot(data_simul_proj, aes(Temp_proj, fill = cut(Temp_proj, 100))) +
212   geom_histogram(show.legend = FALSE) +
213   theme_minimal() +
214   labs(x = "Tiempo", y = "n") +
215   ggtitle("Histograma de la Duración del Proyecto") +

```

```

216 geom_vline(xintercept = proj_dur_05, size = 1, colour = "#FF3721", linetype = "
    dashed") +
217 geom_vline(xintercept = proj_dur_95, size = 1, colour = "#FF3721", linetype = "
    dashed")
218
219 p + scale_fill_discrete(h = c(90, 210), c = 30, l = 50)
220
221 # Curva S
222
223 q <- ggplot(data_simul_proj, aes(Temp_proj)) + stat_ecdf(geom = "step") +
224 ggtitle("Función de Densidad Acumulada Empírica de la Duración del Proyecto") +
225 labs(x = "Tiempo", y = "%") +
226 scale_y_continuous(breaks = seq(0, 1, 0.1), labels = seq(0, 100, 10))
227
228 q
229
230 # Gráfico de Pareto
231
232 bins <- 50
233
234 data <- data_simul_proj %>% mutate(Categoría = cut(Temp_proj, breaks = bins))
235
236 pareto_data <- data %>% count(Categoría) %>% arrange(desc(n)) %>% mutate(
    PorcentajeAcumulado = cumsum(n) / sum(n) * 100)
237
238 ggplot(pareto_data, aes(x = reorder(Categoría, -n), y = n)) +
239 geom_bar(stat = "identity") +
240 geom_line(aes(y = PorcentajeAcumulado * max(n) / 100, group = 1), color = "red") +
241 geom_point(aes(y = PorcentajeAcumulado * max(n) / 100), color = "red") +
242 scale_y_continuous(sec.axis = sec_axis(~ . * 100 / max(pareto_data$n), name = "
    Porcentaje Acumulado")) +
243 labs(x = "Categoría", y = "Frecuencia", title = "Gráfico de Pareto") +
244 theme(axis.text.x = element_text(angle = 90, vjust = 0.5, hjust=1))
245
246
247 # 4.
248
249 ##### Duración de las Tareas #####
250
251 data_simul_tasks <- data.frame(result[[2]])
252
253 ggplot(stack(data_simul_tasks), aes(x = ind, y = values)) +
254 geom_boxplot(fill = '#56B4E9', color = "black") +
255 ggtitle("Boxplot de la Duración de las Tareas") +
256 labs(x = "Tarea", y = "Valores")
257
258 vals_dur_tasks <- apply(data_simul_tasks, 2, quantile, probs = percnts/100)
259
260 # Deciles de las Tareas
261
262 tab_dur_tasks <- as.data.frame(vals_dur_tasks)
263 print(tab_dur_tasks)
264
265 desc_stats_tasks <- describe(data_simul_tasks)
266 desc_stats_tasks$vars <- rownames(desc_stats_tasks)
267 desc_stats_tasks$n <- NULL
268
269 ggplot(desc_stats_tasks, aes(x = reorder(vars, mean), y = mean, main = "Distribución
    de Tareas")) +
270 geom_bar(stat = "identity") +
271 coord_flip() +
272 scale_y_continuous(name = "Duración Promedio de la Tarea (en días)") +
273 scale_x_discrete(name = "Tarea") +
274 theme(axis.text.x = element_text(face = "bold", color = "#008000",
    size = 8, angle = 0),

```

```

276     axis.text.y = element_text(face = "bold", color = "#008000",
277                               size = 8, angle = 0))
278
279
280
281 #Descriptivos de las Tareas
282
283 mean_values <- sapply(data_simul_tasks, mean, na.rm = TRUE)
284 min_values <- sapply(data_simul_tasks, min, na.rm = TRUE)
285 max_values <- sapply(data_simul_tasks, max, na.rm = TRUE)
286
287 tab1_stats <- data.frame(Media = mean_values, Mín = min_values, Máx = max_values)
288 print(tab1_stats)
289
290 sd_values <- sapply(data_simul_tasks, sd, na.rm = TRUE)
291 var_values <- sapply(data_simul_tasks, var, na.rm = TRUE)
292 coefv_values <- sd_values/mean_values
293
294 tab2_stats <- data.frame(DesviaciónEstándar = sd_values, Varianza = var_values, CoefV
295                        = coefv_values)
296 print(tab2_stats)
297
298 # 5. Índices de sensibilidad
299
300 data_simul_CI <- t(result[[3]])
301 # print(data_simul_CI)
302
303 ci_tasks <- data_simul_CI/100
304 sd_tasks <- sd_values
305 # print(sd_tasks)
306
307 indices <- data.frame(sd_tasks, ci_tasks)
308 colnames(indices) <- c("DesviaciónEstándar", "CI")
309
310 sd_project <- sd(data_simul_proj$Temp_proj)
311 # print(sd_project)
312
313 indices$SSI <- (indices$DesviaciónEstándar * indices$CI) / sd_project
314
315 CRI <- apply(data_simul_tasks, 2, function(coluna) cor(data_simul_proj, columna))
316
317 indices$CRI <- CRI
318
319 calculate_slacks <- function(precedence, durations) {
320   num_activities <- ncol(durations)
321   num_simulations <- nrow(durations)
322   slacks <- matrix(0, nrow = num_simulations, ncol = num_activities)
323
324   for (i in 1:num_simulations) {
325     early_times <- early.time(precedence, duration = durations[i, ])
326     late_times <- last.time(precedence, duration = durations[i, ], early.times = early
327                            _times)
328     slacks[i, ] <- late_times - early_times - durations[i, ]
329   }
330   return(slacks)
331 }
332
333 calculate_SI <- function(durations, slacks, project_durations, mean_project_duration)
334 {
335   num_activities <- ncol(durations)
336   SI <- numeric(num_activities)
337
338   for (i in 1:num_activities) {
339     SAD <- durations[, i]

```

```

338   SSL <- slacks[, i]
339   SI[i] <- mean((SAD / (SAD + SSL)) * (project_durations / mean_project_duration))
340 }
341
342 return(SI)
343 }
344
345 slacks <- calculate_slacks(prec, result[[2]])
346 mean_project_duration <- mean(result[[1]])
347 SI <- calculate_SI(result[[2]], slacks, result[[1]], mean_project_duration)
348
349 indices$SI <- SI
350
351 print(indices[, -1])
352
353 indices$vars <- desc_stats_tasks$vars
354
355 ggplot(indices, aes(x = reorder(vars, SI), y = SI, main = "SI de las Tareas")) +
356   geom_bar(stat = "identity") +
357   coord_flip() +
358   scale_y_continuous(name = "SI") +
359   scale_x_discrete(name = "Actividades") +
360   theme(axis.text.x = element_text(face = "bold", color = "#008000",
361                                     size = 8, angle = 0),
362         axis.text.y = element_text(face = "bold", color = "#008000",
363                                     size = 8, angle = 0))
364
365 ggplot(indices, aes(x = reorder(vars, CI), y = CI, main = "CI de las Tareas")) +
366   geom_bar(stat = "identity") +
367   coord_flip() +
368   scale_y_continuous(name = "CI") +
369   scale_x_discrete(name = "Actividades") +
370   theme(axis.text.x = element_text(face = "bold", color = "#008000",
371                                     size = 8, angle = 0),
372         axis.text.y = element_text(face = "bold", color = "#008000",
373                                     size = 8, angle = 0))
374
375 ggplot(indices, aes(x = reorder(vars, CRI), y = CRI, main = "CRI de las Tareas")) +
376   geom_bar(stat = "identity") +
377   coord_flip() +
378   scale_y_continuous(name = "CRI") +
379   scale_x_discrete(name = "Actividades") +
380   theme(axis.text.x = element_text(face = "bold", color = "#008000",
381                                     size = 8, angle = 0),
382         axis.text.y = element_text(face = "bold", color = "#008000",
383                                     size = 8, angle = 0))
384
385 ggplot(indices, aes(x = reorder(vars, SSI), y = SSI, main = "SSI de las Tareas")) +
386   geom_bar(stat = "identity") +
387   coord_flip() +
388   scale_y_continuous(name = "SSI") +
389   scale_x_discrete(name = "Actividades") +
390   theme(axis.text.x = element_text(face = "bold", color = "#008000",
391                                     size = 8, angle = 0),
392         axis.text.y = element_text(face = "bold", color = "#008000",
393                                     size = 8, angle = 0))
394
395
396 # 6.
397
398 # Análisis de sensibilidad del proyecto
399
400
401 inf = 0.15
402 sup = 0.90

```

```

403
404 cond_expect <- function(samp, p1, p2){
405
406   if(p1 < 0 | p2 < 0 | p1 > 1 | p2 >1){
407     stop("Los percentiles deben estar entre 0 y 1")
408   }
409
410   if(p1 >= p2){
411     stop("p1 debe ser mayor que p2")
412   }
413
414   val_p1 <- quantile(samp, p1)
415   val_p2 <- quantile(samp, p2)
416
417   filt_samp_lower <- samp[samp <= val_p1]
418   filt_samp_upper <- samp[samp >= val_p2]
419
420   lower_bound <- mean(filt_samp_lower)
421   upper_bound <- mean(filt_samp_upper)
422
423   return(c(lower_bound, upper_bound))
424 }
425
426
427
428 tornado_project <- cond_expect(data_simul_proj$Temp_proj, inf, sup)
429
430 tornado_tasks <- t(apply(data_simul_tasks, 2, function(coluna) cond_expect(coluna, inf
431   , sup)))
432
433 colnames(tornado_tasks) <- c("Inferior", "Superior")
434
435 df <- data.frame(tornado_tasks)
436 df$Diferencia <- df$Superior - df$Inferior
437 df$Tareas <- factor(rownames(df))
438
439 ggplot(df, aes(y = reorder(Tareas, Diferencia), xmin = Inferior, xmax = Superior,
440   color = Tareas, fill = Tareas)) +
441   geom_linerange(size = 5) +
442   geom_text(aes(x = Inferior, label = round(Inferior, 1)), hjust = 1.1, size = 3,
443     color = "black") +
444   geom_text(aes(x = Superior, label = round(Superior, 1)), hjust = -0.1, size = 3,
445     color = "black") +
446   labs(x = "Días", y = "Actividades") +
447   theme_minimal() +
448   theme(legend.position = "none")
449
450 # 7.
451
452 # Análisis de sensibilidad ajustado del proyecto
453
454 df$Inferior_Rel <- df$Inferior/tornado_project[1]
455 df$Superior_Rel <- df$Superior/tornado_project[2]
456
457 perc <- 0.9
458 perc_proj <- quantile(data_simul_proj$Temp_proj, perc)
459
460 df$Inferior_Proj <- perc_proj * (1 - df$Inferior_Rel)
461 df$Superior_Proj <- perc_proj * (1 + df$Superior_Rel)
462
463 df$Diferencia_Proj <- df$Superior_Proj - df$Inferior_Proj
464
465 ggplot(df, aes(y = reorder(Tareas, Diferencia_Proj), xmin = Inferior_Proj, xmax =
466   Superior_Proj, main = "Tornado de las Tareas", color = Tareas, fill = Tareas)) +
467   geom_linerange(size = 5) +

```

```

463 geom_vline(xintercept = perc_proj, linetype = "dashed", color = "black", size = 1) +
464 geom_text(aes(x = Inferior_Proj, label = round(Inferior_Proj, 1)), hjust = 1.1, size
    = 3, color = "black") +
465 geom_text(aes(x = Superior_Proj, label = round(Superior_Proj, 1)), hjust = -0.1,
    size = 3, color = "black") +
466 labs(x = "Días", y = "Actividades") +
467 theme_minimal() +
468 theme(legend.position = "none")
469
470 # 8.
471
472 # Reserva
473
474 duracion_esperada <- as.numeric(quantile(data_simul_proj$Temp_proj, probs = 0.50))
475 duracion_95 <- as.numeric(quantile(data_simul_proj$Temp_proj, probs = 0.95))
476 reserva_cronograma <- duracion_95 - duracion_esperada
477
478 print(paste("Duración esperada del proyecto: ", duracion_esperada))
479 print(paste("Duración del proyecto en el percentil 95: ", duracion_95))
480 print(paste("Reserva de cronograma: ", reserva_cronograma))
481
482 # Gráfico de Reserva de Cronograma
483 stats <- data.frame(
484   min = min(data_simul_proj$Temp_proj),
485   median = duracion_esperada,
486   p95 = duracion_95,
487   max = max(data_simul_proj$Temp_proj)
488 )
489
490 ggplot() +
491   geom_vline(xintercept = stats$median, color = "blue", linetype = "dashed", size =
    1.2) +
492   geom_vline(xintercept = stats$p95, color = "red", linetype = "dashed", size = 1.2) +
493   geom_rect(aes(xmin = stats$median, xmax = stats$p95, ymin = 0, ymax = 1), fill = "
    lightblue", alpha = 0.4) +
494   xlim(stats$min, stats$max) +
495   labs(
496     title = "Reserva de Cronograma",
497     subtitle = paste("Duración esperada: ", round(as.numeric(stats$median), 2), " días
    \n",
498     "Duración percentil 95: ", round(as.numeric(stats$p95), 2), "
    días\n",
499     "Reserva de cronograma: ", round(reserva_cronograma, 2), " días")
    ,
500     x = "Duración del Proyecto (días)",
501     y = "Reservas de tiempo (días)"
502   ) +
503   theme_minimal() +
504   theme(
505     plot.title = element_text(hjust = 0.5, face = "bold"),
506     plot.subtitle = element_text(hjust = 0.5),
507     axis.title.x = element_text(face = "bold"),
508     axis.title.y = element_text(face = "bold"),
509     axis.text = element_text(face = "bold")
510   ) +
511   geom_text(aes(x = as.numeric(stats$median), y = 1, label = "Duración esperada"),
    vjust = -1, color = "blue", fontface = "bold") +
512   geom_text(aes(x = as.numeric(stats$p95), y = 1, label = "Percentil 95"), vjust = -1,
    color = "red", fontface = "bold") +
513   geom_text(aes(x = (as.numeric(stats$median) + as.numeric(stats$p95)) / 2, y = 0.5,
    label = "Reserva de cronograma"), vjust = 0.5, color = "darkblue", fontface = "bold
    ")

```

A.2. Apéndice B

Simulación del análisis de riesgos en cronograma-costos

```

1 # Preparamos el entorno y importamos librerías
2
3 rm(list=ls())
4
5 options(digits = 8, scipen = 100)
6
7 library(ProjectManagement)
8 library(triangle)
9 library(ggplot2)
10 library(psych)
11 library(dplyr)
12 library(mvtnorm)
13
14 prec <- matrix(0, nrow = 7, ncol = 7)
15
16 prec[1, 2] <- 1; prec[2, 3] <- 1; prec[2, 4] <- 1; prec[4, 5] <- 1;
17 prec[3, 6] <- 1; prec[5, 6] <- 1; prec[6, 7] <- 1;
18
19 distribution_duration <- c(rep("TRIANGLE", 7))
20 distribution_costs <- c(rep("NORMAL", 7))
21
22 values_duration <- matrix(c(5, 9, 7, 10, 20, 15, 20, 30, 25, 8, 12, 10, 5, 8, 6, 7,
23   14, 10, 2 ,4, 3), nrow = 7, ncol = 3, byrow = T)
24
25 values_costs <- matrix(c(1000, 200, 0, 3000, 600, 0, 5000, 1000, 0, 2000, 400, 0,
26   1000, 200, 0, 3000, 600, 0, 500 ,100, 0), nrow = 7, ncol = 3, byrow = T)
27
28 prec3and4 <- matrix(0)
29
30 # 1. Funcion para aplicar PERT estocástico
31
32 stochastic.pert.2 <- function(prec1and2 = matrix(0), prec3and4 = matrix(0),
33   distribution_duration, values_duration, distribution_costs, values_costs,
34   percentile = 0.95, plot.activities.times = NULL, compilations = 10000){
35
36   or1 <- order(organize(prec1and2,prec3and4)$Order[,2])
37   or2 <- organize(prec1and2,prec3and4)$Order[,2]
38
39   precedence <- organize(prec1and2,prec3and4)$Precedence
40
41   activities <- c(1:dim(precedence)[1])
42   n <- length(activities)
43
44   distribution <- distribution_duration[or2]
45   values <- values_duration[or2, ]
46
47   distribution_costs <- distribution_costs[or2]
48   values_costs <- values_costs[or2, ]
49
50   if(is.null(plot.activities.times)==FALSE){
51     T.E<-matrix(0,nrow=compilations,ncol=length(plot.activities.times))
52     T.L<-matrix(0,nrow=compilations,ncol=length(plot.activities.times))
53   }
54
55   tiempo.computacion <- numeric(compilations)
56
57   caminos.criticos<-matrix(0,nrow=compilations,ncol=length(activities))
58
59   C<-numeric(length(activities))
60   n<-length(activities)

```

```

57 tiempo.early<-rep(0,n)
58 tiempo.last<-rep(0,n)
59
60 duration <- matrix(0, nrow=compilations, ncol=length(activities))
61 costs <- matrix(0, nrow=compilations, ncol=length(activities))
62
63 ii<-as.logical(colSums(precedence))
64 iii<-activities[ii]
65 nn<-length(iii)
66
67 if(nn>0){
68   prec<-matrix(0,nrow=nn,ncol=n-1)
69   for(j in 1:length(iii)){
70     prec[j,1:length(which(precedence[,iii[j]]==1))]<-which(precedence[,iii[j]]==1)
71   }
72   prec<-prec[,as.logical(colSums(prec)),drop=FALSE]
73 }
74
75 ii1<-as.logical(rowSums(precedence))
76 iii1<-activities[ii1]
77 nn1<-length(iii1)
78 if(nn1>0){
79   prec1<-matrix(0,nrow=length(iii1),ncol=n-1)
80
81   for(j in 1:length(iii1)){
82     prec1[j,1:length(which(precedence[iii1[j],]==1))]<-which(precedence[iii1[j],]==1)
83   }
84
85   prec1<-prec1[,as.logical(colSums(prec1)),drop=FALSE]
86 }
87
88 # Generación de variables uniformes correlacionadas
89 correlation_matrix <- matrix(0.8, nrow = n, ncol = n)
90 diag(correlation_matrix) <- 1
91 uniform_correlated <- rmvnorm(compilations, sigma = correlation_matrix)
92 uniform_correlated <- pnorm(uniform_correlated)
93
94 for(j in 1:length(activities)){
95   if(distribution[j] == "TRIANGLE"){
96     duration[, j] <- qtriangle(uniform_correlated[, j], values[j, 1], values[j, 2],
97     values[j, 3])
98   }
99 }
100
101 for(j in 1:length(activities)){
102   if(distribution_costs[j] == "NORMAL"){
103     costs[, j] <- qnorm(uniform_correlated[, j], values_costs[j, 1], values_costs[j,
104     2])
105   }
106 }
107
108 for(i in 1:compilations){
109   if(nn>0){
110     for(j in 1:length(iii)) {
111       tiempo.early[iii[j]] = max(tiempo.early[prec[j,]] + duration[i, prec[j,]])
112     }
113   }
114
115   tiempo.last[activities[iii]==FALSE] <- max(tiempo.early + duration[i,])
116   if(nn1>0){
117     for(j in length(iii1):1) {
118       tiempo.last[iii1[j]] = min(tiempo.last[prec1[j,]] - duration[i, prec1[j,]])
119     }
120   }

```

```

119   if(is.null(plot.activities.times)==FALSE){
120     T.E[i,] <- tiempo.early[plot.activities.times]
121     T.L[i,] <- tiempo.last[plot.activities.times]
122   }
123
124   tiempo.computacion[i] <- max(tiempo.early + duration[i,])
125   caminos.criticos[i,] <- (tiempo.last - tiempo.early - duration[i,])
126 }
127
128 caminos.criticos <- round(caminos.criticos, 4)
129
130 return(list(tiempo.computacion, duration, costs))
131 }
132
133 # 2. Simulación
134
135 result <- stochastic.pert.2(prec, prec3and4, distribution_duration, values_duration,
136   distribution_costs, values_costs, percentile = 0.95, plot.activities.times = c(1),
137   compilations = 1000)
138
139 # 3. Correlación
140 data_simul_tasks <- result[[2]]
141 data_simul_costs_tasks <- result[[3]]
142
143 correl <- vector("numeric", length = ncol(data_simul_costs_tasks))
144
145 for (i in 1:ncol(data_simul_costs_tasks)) {
146   correl[i] <- round(cor(data_simul_costs_tasks[, i], data_simul_tasks[, i]), 4)
147 }
148
149 print(correl)
150
151 # 4. Calcular el Coeficiente de Variación Ajustado (CV_adj)
152 medias_duraciones <- apply(result[[2]], 2, mean, na.rm = TRUE)
153 medias_costos <- apply(result[[3]], 2, mean, na.rm = TRUE)
154 sd_costos <- apply(result[[3]], 2, sd, na.rm = TRUE)
155
156 cv_adj <- sd_costos / (medias_costos * medias_duraciones)
157
158 # Crear un data frame con los resultados
159 cv_adj_df <- data.frame(Tarea = 1:length(cv_adj), CV_adj = cv_adj)
160 print(cv_adj_df)
161
162 # Graficar el Coeficiente de Variación Ajustado
163 ggplot(cv_adj_df, aes(x = factor(Tarea), y = CV_adj)) +
164   geom_bar(stat = "identity", fill = "lightblue", color = "black") +
165   theme_minimal() +
166   labs(
167     title = "Coeficiente de Variación Ajustado (CV_adj) por Tarea",
168     x = "Tarea",
169     y = "CV_adj"
170   ) +
171   theme(
172     plot.title = element_text(hjust = 0.5, face = "bold"),
173     axis.title.x = element_text(face = "bold"),
174     axis.title.y = element_text(face = "bold"),
175     axis.text = element_text(face = "bold")
176   )
177
178 # 5. Análisis de la Duración del Proyecto
179
180 data_simul_proj <- data.frame(result[[1]])
181 colnames(data_simul_proj) <- c("Temp_proj")
182
183 print(describe(data_simul_proj$Temp_proj))

```

```

182
183 percnts <- c(1, 5, 15, 25, 35, 45, 50, 65, 75, 85, 95, 99)
184 vals_dur_proj <- quantile(data_simul_proj$Temp_proj, probs = percnts/100)
185
186 tab_dur_proj <- data.frame(Percentile = percnts/100, Values = vals_dur_proj)
187 print(tab_dur_proj)
188
189 proj_dur_05 <- quantile(data_simul_proj$Temp_proj, probs = 0.05)
190 proj_dur_95 <- quantile(data_simul_proj$Temp_proj, probs = 0.95)
191
192 p <- ggplot(data_simul_proj, aes(Temp_proj, fill = cut(Temp_proj, 100))) +
193   geom_histogram(show.legend = FALSE) +
194   theme_minimal() +
195   labs(x = "Tiempo", y = "n") +
196   ggtitle("Histograma de la Duración del Proyecto") +
197   geom_vline(xintercept = proj_dur_05, size = 1, colour = "#FF3721", linetype = "
198     dashed") +
199   geom_vline(xintercept = proj_dur_95, size = 1, colour = "#FF3721", linetype = "
200     dashed")
201
202 p + scale_fill_discrete(h = c(90, 210), c = 30, l = 50)
203
204 # S Curve
205
206 q <- ggplot(data_simul_proj, aes(Temp_proj)) + stat_ecdf(geom = "step") +
207   ggtitle("Función de Densidad Acumulada Empírica de la Duración del Proyecto ") +
208   labs(x = "Tiempo", y = "%") +
209   scale_y_continuous(breaks = seq(0, 1, 0.1), labels = seq(0, 100, 10))
210
211 # Pareto Plot
212
213 bins <- 50
214
215 data <- data_simul_proj %>% mutate(Category = cut(Temp_proj, breaks = bins))
216
217 pareto_data <- data %>% count(Category) %>% arrange(desc(n)) %>% mutate(
218   CumulativePercentage = cumsum(n) / sum(n) * 100)
219
220 ggplot(pareto_data, aes(x = reorder(Category, -n), y = n)) +
221   geom_bar(stat = "identity") +
222   geom_line(aes(y = CumulativePercentage * max(n) / 100, group = 1), color = "red") +
223   geom_point(aes(y = CumulativePercentage * max(n) / 100), color = "red") +
224   scale_y_continuous(sec.axis = sec_axis(~ . * 100 / max(pareto_data$n), name = "
225     Porcentaje Acumulativo")) +
226   labs(x = "Categoría", y = "Frecuencia", title = "Diagrama de Pareto-Proyecto") +
227   theme(axis.text.x = element_text(angle = 90, vjust = 0.5, hjust=1))
228
229 # 6. Análisis de la Duración de las Tareas
230
231 data_simul_tasks <- data.frame(result[[2]])
232
233 ggplot(stack(data_simul_tasks), aes(x = ind, y = values)) +
234   geom_boxplot(fill = '#56B4E9', color = "black") +
235   ggtitle("Diagrama de Caja de las Duraciones de las Tareas") + labs(x = "Tarea", y =
236     "Valores")
237
238 vals_dur_tasks <- apply(data_simul_tasks, 2, quantile, probs = percnts/100)
239
240 # Deciles de las tareas
241
242 tab_dur_tasks <- as.data.frame(vals_dur_tasks)
243 print(tab_dur_tasks)
244

```

```

242 desc_stats_tasks <- describe(data_simul_tasks)
243 desc_stats_tasks$vars <- rownames(desc_stats_tasks)
244 desc_stats_tasks$n <- NULL
245
246 ggplot(desc_stats_tasks, aes(x = reorder(vars, mean), y = mean, main = "Distribución
  de Tareas")) +
247   geom_bar(stat = "identity") +
248   coord_flip() + scale_y_continuous(name = "Duración Promedio de la Tarea (en días)")
  +
249   scale_x_discrete(name = "Tarea") +
250   theme(axis.text.x = element_text(face = "bold", color = "#008000",
251     size = 8, angle = 0),
252     axis.text.y = element_text(face = "bold", color = "#008000",
253     size = 8, angle = 0))
254
255 # 6.1 Descriptivos de las Tareas
256
257 mean_values <- sapply(data_simul_tasks, mean, na.rm = TRUE)
258 min_values <- sapply(data_simul_tasks, min, na.rm = TRUE)
259 max_values <- sapply(data_simul_tasks, max, na.rm = TRUE)
260
261 tab1_stats <- data.frame(Mean = mean_values, Min = min_values, Max = max_values)
262 print(tab1_stats)
263
264 sd_values <- sapply(data_simul_tasks, sd, na.rm = TRUE)
265 var_values <- sapply(data_simul_tasks, var, na.rm = TRUE)
266 coefv_values <- sd_values/mean_values
267
268 tab2_stats <- data.frame(SD = sd_values, Var = var_values, CoefV = coefv_values)
269 print(tab2_stats)
270
271 # 7. Análisis de Costos del Proyecto
272
273 data_simul_costs <- data.frame(rowSums(result[[3]]))
274 colnames(data_simul_costs) <- c("Costs_proj")
275
276 print(describe(data_simul_costs$Costs_proj))
277
278 vals_dur_proj <- quantile(data_simul_costs$Costs_proj, probs = percnts/100)
279
280 tab_dur_proj <- data.frame(Percentile = percnts/100, Values = vals_dur_proj)
281 print(tab_dur_proj)
282
283 proj_dur_05 <- quantile(data_simul_costs$Costs_proj, probs = 0.05)
284 proj_dur_95 <- quantile(data_simul_costs$Costs_proj, probs = 0.95)
285
286 p <- ggplot(data_simul_costs, aes(Costs_proj, fill = cut(Costs_proj, 100))) +
287   geom_histogram(show.legend = FALSE) +
288   theme_minimal() +
289   labs(x = "Valor", y = "n") +
290   ggtitle("Histograma de los Costos del Proyecto") +
291   geom_vline(xintercept = proj_dur_05, size = 1, colour = "#FF3721", linetype = "
  dashed") +
292   geom_vline(xintercept = proj_dur_95, size = 1, colour = "#FF3721", linetype = "
  dashed")
293
294 p + scale_fill_discrete(h = c(90, 210), c = 30, l = 50)
295
296 # S Curve
297
298 q <- ggplot(data_simul_costs, aes(Costs_proj)) + stat_ecdf(geom = "step") +
299   ggtitle("Función de Densidad Acumulada Empírica de los Costos del Proyecto ") +
300   labs(x = "Valor", y = "%") +
301   scale_y_continuous(breaks = seq(0, 1, 0.1), labels = seq(0, 100, 10))
302

```

```

303 q
304
305 # Pareto Plot
306
307 data <- data_simul_costs %>% mutate(Category = cut(Costs_proj, breaks = bins))
308
309 pareto_data <- data %>% count(Category) %>% arrange(desc(n)) %>% mutate(
  CumulativePercentage = cumsum(n) / sum(n) * 100)
310
311 ggplot(pareto_data, aes(x = reorder(Category, -n), y = n)) +
312   geom_bar(stat = "identity") +
313   geom_line(aes(y = CumulativePercentage * max(n) / 100, group = 1), color = "red") +
314   geom_point(aes(y = CumulativePercentage * max(n) / 100), color = "red") +
315   scale_y_continuous(sec.axis = sec_axis(~ . * 100 / max(pareto_data$n), name = "
  Porcentaje Acumulativo")) +
316   labs(x = "Categoría", y = "Frecuencia", title = "Diagrama de Pareto") +
317   theme(axis.text.x = element_text(angle = 90, vjust = 0.5, hjust=1))
318
319 # 8. Análisis de Sensibilidad
320
321 # Tornado (conditional expectations)
322
323 # Definir percentiles de interés
324 inf <- 0.15
325 sup <- 0.90
326
327 # Función para calcular expectativas condicionales
328 cond_expect <- function(samp, p1, p2) {
329   if(p1 < 0 | p2 < 0 | p1 > 1 | p2 > 1) stop("Percentiles must be between 0 and 1")
330   if(p1 >= p2) stop("p1 must be greater than p2")
331
332   val_p1 <- quantile(samp, p1)
333   val_p2 <- quantile(samp, p2)
334
335   filt_samp_lower <- samp[samp <= val_p1]
336   filt_samp_upper <- samp[samp >= val_p2]
337
338   lower_bound <- mean(filt_samp_lower)
339   upper_bound <- mean(filt_samp_upper)
340
341   return(c(lower_bound, upper_bound))
342 }
343
344 # 8.1 Sensibilidad para la Duración del Proyecto
345 # 8.1.1 Análisis de sensibilidad del proyecto- Cronograma
346
347 tornado_project <- cond_expect(data_simul_proj$Temp_proj, inf, sup)
348
349 # Calcular expectativas condicionales para cada tarea
350 tornado_tasks <- t(apply(data_simul_tasks, 2, function(coluna) cond_expect(coluna, inf
  , sup)))
351
352 # Crear el data frame para el gráfico tornado
353 colnames(tornado_tasks) <- c("Lower", "Upper")
354 df <- data.frame(tornado_tasks)
355 df$Diference <- df$Upper - df$Lower
356 df$Tasks <- factor(rownames(df))
357
358 # Graficar el gráfico tornado para la duración del cronograma
359 ggplot(df, aes(y = reorder(Tasks, Diference), xmin = Lower, xmax = Upper, color =
  Tasks, fill = Tasks)) +
360   geom_linerange(size = 5) +
361   geom_text(aes(x = Lower, label = round(Lower, 1)), hjust = 1.1, size = 3, color = "
  black") +
362   geom_text(aes(x = Upper, label = round(Upper, 1)), hjust = -0.1, size = 3, color = "

```

```

    black") +
363 labs(x = "Días", y = "Actividades", title = "Variabilidad de las Duraciones de las
    Tareas") +
364 theme_minimal() +
365 theme(legend.position = "none")
366
367 # 8.1.2 Análisis de sensibilidad ajustado del proyecto- Cronograma
368
369 df$Lower_Rel <- df$Lower/tornado_project[1]
370 df$Upper_Rel <- df$Upper/tornado_project[2]
371
372 perc <- 0.9
373 perc_proj <- quantile(data_simul_proj$Temp_proj, perc)
374
375 df$Lower_Proj <- perc_proj * (1 - df$Lower_Rel)
376 df$Upper_Proj <- perc_proj * (1 + df$Upper_Rel)
377 df$Diference_Proj <- df$Upper_Proj - df$Lower_Proj
378
379 # Graficar el gráfico tornado relativo para la duración del cronograma
380 ggplot(df, aes(y = reorder(Tasks, Diference_Proj), xmin = Lower_Proj, xmax = Upper_
    Proj, color = Tasks, fill = Tasks)) +
381 geom_linerange(size = 5) +
382 geom_vline(xintercept = perc_proj, linetype = "dashed", color = "black", size = 1) +
383 geom_text(aes(x = Lower_Proj, label = round(Lower_Proj, 1)), hjust = 1.1, size = 3,
    color = "black") +
384 geom_text(aes(x = Upper_Proj, label = round(Upper_Proj, 1)), hjust = -0.1, size = 3,
    color = "black") +
385 labs(x = "Días", y = "Actividades", title = "Análisis de Sensibilidad Ajustado para
    las Duraciones") +
386 theme_minimal() +
387 theme(legend.position = "none")
388
389 # 8.2 Sensibilidad para los Costos del Proyecto
390
391 # 8.2.1 Análisis de sensibilidad del proyecto-Costos
392
393 tornado_project_costs <- cond_expect(data_simul_costs$Costs_proj, inf, sup)
394 tornado_tasks_costs <- t(apply(data_simul_tasks, 2, function(coluna) cond_expect(
    columna, inf, sup)))
395
396 colnames(tornado_tasks_costs) <- c("Lower", "Upper")
397 df_costs <- data.frame(tornado_tasks_costs)
398 df_costs$Diference <- df_costs$Upper - df_costs$Lower
399 df_costs$Tasks <- factor(rownames(df_costs))
400
401 ggplot(df_costs, aes(y = reorder(Tasks, Diference), xmin = Lower, xmax = Upper, color
    = Tasks, fill = Tasks)) +
402 geom_linerange(size = 5) +
403 geom_text(aes(x = Lower, label = round(Lower, 1)), hjust = 1.1, size = 3, color = "
    black") +
404 geom_text(aes(x = Upper, label = round(Upper, 1)), hjust = -0.1, size = 3, color = "
    black") +
405 labs(x = "Costos", y = "Actividades", title = "Variabilidad de los Costos de las
    Tareas") +
406 theme_minimal() +
407 theme(legend.position = "none")
408
409 # 8.2.2 Análisis de sensibilidad ajustado del proyecto- Costos
410
411 df_costs$Lower_Rel <- df_costs$Lower / tornado_project_costs[1]
412 df_costs$Upper_Rel <- df_costs$Upper / tornado_project_costs[2]
413
414 perc_costs <- 0.9
415 perc_proj_costs <- quantile(data_simul_costs$Costs_proj, perc_costs)
416

```

```

417 df_costs$Lower_Proj <- perc_proj_costs * (1 - df_costs$Lower_Rel)
418 df_costs$Upper_Proj <- perc_proj_costs * (1 + df_costs$Upper_Rel)
419 df_costs$Diference_Proj <- df_costs$Upper_Proj - df_costs$Lower_Proj
420
421 ggplot(df_costs, aes(y = reorder(Tasks, Diference_Proj), xmin = Lower_Proj, xmax =
  Upper_Proj, color = Tasks, fill = Tasks)) +
422   geom_linerange(size = 5) +
423   geom_vline(xintercept = perc_proj_costs, linetype = "dashed", color = "black", size
    = 1) +
424   geom_text(aes(x = Lower_Proj, label = round(Lower_Proj, 1)), hjust = 1.1, size = 3,
    color = "black") +
425   geom_text(aes(x = Upper_Proj, label = round(Upper_Proj, 1)), hjust = -0.1, size = 3,
    color = "black") +
426   labs(x = "Costos", y = "Actividades", title = "Análisis de Sensibilidad Ajustado
    para los Costos") +
427   theme_minimal() +
428   theme(legend.position = "none")
429
430 # 9. Reserva
431
432 # Reserva de Costos
433
434 costo_esperado <- as.numeric(quantile(data_simul_costs$Costs_proj, probs = 0.50))
435 costo_95 <- as.numeric(quantile(data_simul_costs$Costs_proj, probs = 0.95))
436 reserva_costos <- costo_95 - costo_esperado
437
438 print(paste("Costo esperado del proyecto: ", costo_esperado))
439 print(paste("Costo del proyecto en el percentil 95: ", costo_95))
440 print(paste("Reserva de costos: ", reserva_costos))
441
442 stats <- data.frame(
443   min = min(data_simul_costs$Costs_proj),
444   median = costo_esperado,
445   p95 = costo_95,
446   max = max(data_simul_costs$Costs_proj)
447 )
448
449 ggplot() +
450   geom_vline(xintercept = stats$median, color = "blue", linetype = "dashed", size =
    1.2) +
451   geom_vline(xintercept = stats$p95, color = "red", linetype = "dashed", size = 1.2) +
452   geom_rect(aes(xmin = stats$median, xmax = stats$p95, ymin = 0, ymax = 1), fill = "
    lightblue", alpha = 0.4) +
453   xlim(stats$min, stats$max) +
454   labs(
455     title = "Reserva de Costos",
456     subtitle = paste("Costo esperado: ", round(as.numeric(stats$median), 2), "
    unidades\n",
457       "Costo percentil 95: ", round(as.numeric(stats$p95), 2), "
    unidades\n",
458       "Reserva de costos: ", round(reserva_costos, 2), " unidades"),
459     x = "Costos del Proyecto (unidades)",
460     y = "Reservas de costos (unidades)"
461 ) +
462   theme_minimal() +
463   theme(
464     plot.title = element_text(hjust = 0.5, face = "bold"),
465     plot.subtitle = element_text(hjust = 0.5),
466     axis.title.x = element_text(face = "bold"),
467     axis.title.y = element_text(face = "bold"),
468     axis.text = element_text(face = "bold")
469 ) +
470   geom_text(aes(x = as.numeric(stats$median), y = 1, label = "Costo esperado"), vjust
    = -1, color = "blue", fontface = "bold") +
471   geom_text(aes(x = as.numeric(stats$p95), y = 1, label = "Percentil 95"), vjust = -1,

```

```

472   color = "red", fontface = "bold") +
geom_text(aes(x = (as.numeric(stats$median) + as.numeric(stats$p95)) / 2, y = 0.5,
473   label = "Reserva de costos"), vjust = 0.5, color = "darkblue", fontface = "bold")
474 # Reserva de Cronograma
475
476 duracion_esperada <- as.numeric(quantile(data_simul_proj$Temp_proj, probs = 0.50))
477 duracion_95 <- as.numeric(quantile(data_simul_proj$Temp_proj, probs = 0.95))
478 reserva_cronograma <- duracion_95 - duracion_esperada
479
480 print(paste("Duración esperada del proyecto: ", duracion_esperada))
481 print(paste("Duración del proyecto en el percentil 95: ", duracion_95))
482 print(paste("Reserva de cronograma: ", reserva_cronograma))
483
484 stats <- data.frame(
485   min = min(data_simul_proj$Temp_proj),
486   median = duracion_esperada,
487   p95 = duracion_95,
488   max = max(data_simul_proj$Temp_proj)
489 )
490
491 ggplot() +
492   geom_vline(xintercept = stats$median, color = "blue", linetype = "dashed", size =
1.2) +
493   geom_vline(xintercept = stats$p95, color = "red", linetype = "dashed", size = 1.2) +
494   geom_rect(aes(xmin = stats$median, xmax = stats$p95, ymin = 0, ymax = 1), fill = "
lightblue", alpha = 0.4) +
495   xlim(stats$min, stats$max) +
496   labs(
497     title = "Reserva de Cronograma",
498     subtitle = paste("Duración esperada: ", round(as.numeric(stats$median), 2), " días
\n",
499     "Duración percentil 95: ", round(as.numeric(stats$p95), 2), "
días\n",
500     "Reserva de cronograma: ", round(reserva_cronograma, 2), " días")
,
501     x = "Duración del Proyecto (días)",
502     y = "Reservas de tiempo (días)"
) +
503   theme_minimal() +
504   theme(
505     plot.title = element_text(hjust = 0.5, face = "bold"),
506     plot.subtitle = element_text(hjust = 0.5),
507     axis.title.x = element_text(face = "bold"),
508     axis.title.y = element_text(face = "bold"),
509     axis.text = element_text(face = "bold")
) +
510   geom_text(aes(x = as.numeric(stats$median), y = 1, label = "Duración esperada"),
vjust = -1, color = "blue", fontface = "bold") +
511   geom_text(aes(x = as.numeric(stats$p95), y = 1, label = "Percentil 95"), vjust = -1,
color = "red", fontface = "bold") +
512   geom_text(aes(x = (as.numeric(stats$median) + as.numeric(stats$p95)) / 2, y = 0.5,
label = "Reserva de cronograma"), vjust = 0.5, color = "darkblue", fontface = "bold
")

```

A.3. Apéndice C

Earned Value Management

```

1 # Preparamos el entorno, importamos librerías y leemos ficheros
2
3 rm(list=ls())

```

```

4
5 options(digits = 8, scipen = 100)
6
7 library(readxl)
8 library(triangle)
9 library(psych)
10 library(ggplot2)
11 library(reshape2)
12 library(knitr)
13 library(kableExtra)
14 library(dplyr)
15
16
17 # Leemos y preparamos datos
18 data_PV <- read_excel('Data_EVM_2.xlsx', sheet = 'PV')
19 data_PV
20
21 data_EV <- read_excel('Data_EVM_2.xlsx', sheet = 'EV')
22 data_EV
23
24 data_AC <- read_excel('Data_EVM_2.xlsx', sheet = 'AC')
25 data_AC
26
27 PV_Matrix <- as.matrix(data_PV[,3:14])
28 PV_Matrix[is.na(PV_Matrix)] <- 0
29
30 TBC <- rowSums(PV_Matrix)
31 TBC
32
33 #Performance Measurement Baseline
34 data_pv <- cbind(data_PV[, 1:2], Budget = TBC, data_PV[, 3:ncol(data_PV)])
35
36 PV <- colSums(PV_Matrix)
37 PV
38
39 BAC <- sum(TBC)
40 BAC
41
42 pv_df <- c("Total", "", BAC, PV)
43 pva_df <- c("Acumulado", "", "", cumsum(PV))
44
45 PMB <- rbind(data_pv, pv_df, pva_df)
46 PMB
47
48 # seguimiento de la organización de datos
49 EV_Matrix <- as.matrix(data_EV[,3:14])
50 EV_Matrix[is.na(EV_Matrix)] <- 0
51
52 EV <- t(EV_Matrix) %*% TBC
53 EV
54
55 AC_Matrix <- as.matrix(data_AC[,3:14])
56 AC_Matrix[is.na(AC_Matrix)] <- 0
57
58 AC <- colSums(AC_Matrix)
59 AC
60
61 ind <- c(1:12)
62 # ind <- as.character(colnames(data_AC[3:14]))
63
64 data <- data.frame(ind, PV, AC, EV)
65 data[data == 0] <- NA
66
67 # 1. Acumulado
68

```

```

69 data$PVA <- cumsum(data$PV)
70 data$ACA <- cumsum(data$AC)
71 data$EVA <- data$EV
72
73 data$CV <- data$EVA - data$ACA
74 data$CPI <- data$EVA/data$ACA
75 data$SV <- data$EVA - data$PVA
76 data$SPI <- data$EVA/data$PVA
77 data$EAC <- BAC/data$CPI
78 data$ETC <- data$EAC - data$ACA
79 data$VAC <- BAC - data$EAC
80 data$TCPI <- (BAC - data$EVA)/data$ETC
81 data$DP <- data$EAC/BAC
82 data$IPE <- (data$CPI + data$SPI)/2
83
84 tab_acum <- data[ , 5:7]
85 t(tab_acum)
86
87 sv_cv <- as.matrix(data[ , c(8,10)])
88
89 barplot(t(sv_cv), beside = TRUE, col = c("pink", "gray"),
90         legend.text = c("CV", "SV"),
91         main = "Gráfico de Barras CV/SV",
92         xlab = "Semanas",
93         ylab = "Valor")
94
95 require(ggrepel)
96
97
98 q <- ggplot(data, aes(x = SPI, y = CPI)) +
99   geom_point(size = 3) +
100   geom_hline(yintercept = 1, size = 1, colour = "#A52A2A", linetype = "dashed") +
101   geom_vline(xintercept = 1, size = 1, colour = "#A52A2A", linetype = "dashed")
102
103 q + geom_text_repel(aes(label = rownames(data)), size = 3.5) +
104   annotate("text", x = 1.25, y = 1.45, label = "Adelantado, por debajo del presupuesto",
105           size = 3) +
106   annotate("text", x = 0.75, y = 1.45, label = "Atrasado, por debajo del presupuesto",
107           size = 3) +
108   annotate("text", x = 0.75, y = 0.65, label = "Atrasado, por encima del presupuesto",
109           size = 3) + annotate("text", x = 1.25, y = 0.65, label = "Adelantado, por encima
110   del presupuesto", size = 3)
111
112
113 dp_ipe <- round(data[ 1:7, c(16,17)], 4)
114 dp_ipe
115
116 dp_ipe %>% mutate(
117   DP = cell_spec(DP, "html", color = ifelse(DP < 1, "green", ifelse(DP < 1.1, "blue",
118   "red"))),
119   IPE = cell_spec(IPE, "html", color = ifelse(IPE > 1, "green", ifelse(IPE >= 0.85, "
120   blue", ifelse(IPE >= 0.65, "yellow", "red"))))) %>%
121   select(DP, IPE) %>%
122   kable("html", escape = F) %>%
123   kable_styling("striped", full_width = F)
124
125 # 2.
126
127 # Now we melt the table
128 data_melt <- melt(data, id = "ind")
129 data_melt
130

```

```

128 subset_data_1 <- subset(data_melt, variable %in% c("CPI", "SPI"))
129
130 ggplot(data = na.omit(subset_data_1)) +
131   geom_line(aes(x = ind, y = value, colour = variable, group = variable)) +
132   scale_x_continuous(breaks = c(1:12)) +
133   geom_vline(xintercept = 7, size = 1, colour = "#A52A2A", linetype = "dashed")
134
135 subset_data_2 <- subset(data_melt, variable %in% c("PVA", "ACA", "EVA"))
136
137 ggplot(data = na.omit(subset_data_2)) +
138   geom_line(aes(x = ind, y = value, colour = variable, group = variable)) +
139   scale_x_continuous(breaks = c(1:12)) +
140   geom_vline(xintercept = 7, size = 1, colour = "#A52A2A", linetype = "dashed")
141
142 # 3.
143
144 n_simul <- 10000
145
146 control <- 8
147 prob_oti <- 0.9
148 prob_pes <- 1.2
149
150 prov <- data$PV[control]
151 oti <- prob_oti*prov
152 pes <- prob_pes*prov
153
154 simul_pv <- rtriangle(n_simul, oti, pes, prov)
155 hist(simul_pv, breaks = 100, main = "PV - Triangle Distribution", xlab = "x")
156
157 simul_ac <- rtriangle(n_simul, oti, pes, prov)
158 hist(simul_ac, breaks = 100, main = "AC - Triangle Distribution", xlab = "x")
159
160 simul_ev <- rtriangle(n_simul, oti, pes, prov)
161 hist(simul_ev, breaks = 100, main = "EV - Triangle Distribution", xlab = "x")
162
163
164 # 4.
165
166 data_simul <- data.frame(simul_pv, simul_ac, simul_ev)
167
168 colnames(data_simul) <- c("PV", "AC", "EV")
169
170 data_simul$PVA <- data$PVA[control-1] + data_simul$PV
171 data_simul$ACA <- data$ACA[control-1] + data_simul$AC
172 data_simul$EVA <- data$EVA[control-1] + data_simul$EV
173
174 data_simul$CV <- data_simul$EVA - data_simul$ACA
175 data_simul$CPI <- data_simul$EVA/data_simul$ACA
176 data_simul$SV <- data_simul$EVA - data_simul$PVA
177 data_simul$SPI <- data_simul$EVA/data_simul$PVA
178 data_simul$EAC <- BAC/data_simul$CPI
179 data_simul$ETC <- data_simul$EAC - data_simul$ACA
180 data_simul$VAC <- BAC - data_simul$EAC
181 data_simul$TCPI <- (BAC - data_simul$EVA)/data_simul$ETC
182
183 data_simul$DP <- data_simul$EAC/BAC
184 data_simul$IPE <- (data_simul$CPI + data_simul$SPI)/2
185
186 p <- ggplot(data_simul, aes(CPI, fill = cut(CPI, 100))) +
187   geom_histogram(show.legend = FALSE) +
188   theme_minimal() +
189   labs(x = "CPI", y = "n") +
190   ggtitle("Histograma CPI") +
191   geom_vline(xintercept = 1.0, size = 1, colour = "#FF3721", linetype = "dashed")
192

```

```

193 p + scale_fill_discrete(h = c(90, 210), c = 30, l = 50)
194
195 p2 <- ggplot(data_simul, aes(SPI, fill = cut(SPI, 100))) +
196   geom_histogram(show.legend = FALSE) +
197   theme_minimal() +
198   labs(x = "SPI", y = "n") +
199   ggtitle("Histograma SPI") +
200   geom_vline(xintercept = 1.0, size = 1, colour = "#FF3721", linetype = "dashed")
201
202 p2 + scale_fill_discrete(h = c(90, 210), c = 30, l = 50)
203
204
205 q <- ggplot(data_simul, aes(CPI)) + stat_ecdf(geom = "step") +
206   ggtitle("Empirical Cumulative Density Function of CPI") +
207   labs(x = "CPI", y = "%") +
208   scale_y_continuous(breaks = seq(0, 1, 0.1), labels = seq(0,100,10)) +
209   geom_vline(xintercept = 1.0, size = 1, colour = "#FF3721", linetype = "dashed")
210
211 q
212
213 q2 <- ggplot(data_simul, aes(SPI)) + stat_ecdf(geom = "step") +
214   ggtitle("Empirical Cumulative Density Function of SPI") +
215   labs(x = "SPI", y = "%") +
216   scale_y_continuous(breaks = seq(0, 1, 0.1), labels = seq(0,100,10)) +
217   geom_vline(xintercept = 1.0, size = 1, colour = "#FF3721", linetype = "dashed")
218
219 q2
220
221 print(describe(data_simul$CPI))
222
223 percnts <- c(0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100)
224 vals_cpi <- quantile(data_simul$CPI, probs = percnts/100)
225
226 tab_cpi <- data.frame(Percentile = percnts/100, Values = vals_cpi)
227 print(tab_cpi)
228
229 cpi_05 <- quantile(data_simul$CPI, probs = 0.05)
230 cpi_95 <- quantile(data_simul$CPI, probs = 0.95)
231
232 hist(data_simul$CPI, breaks = 100, main = "CPI Distribution", xlab = "CPI")
233 abline(v = cpi_05, col = "black", lwd = 2, lty = 2)
234 abline(v = cpi_95, col = "black", lwd = 2, lty = 2)
235
236 print(describe(data_simul$SPI))
237
238 vals_spi <- quantile(data_simul$SPI, probs = percnts/100)
239
240 tab_spi <- data.frame(Percentile = percnts/100, Values = vals_spi)
241 print(tab_spi)
242
243 spi_05 <- quantile(data_simul$SPI, probs = 0.05)
244 spi_95 <- quantile(data_simul$SPI, probs = 0.95)
245
246 hist(data_simul$SPI, breaks = 100, main = "SPI Distribution", xlab = "SPI")
247 abline(v = spi_05, col = "black", lwd = 2, lty = 2)
248 abline(v = spi_95, col = "black", lwd = 2, lty = 2)
249
250 # 5.
251
252 p <- ggplot(data_simul, aes(DP, fill = cut(DP, 100))) +
253   geom_histogram(show.legend = FALSE) +
254   theme_minimal() +
255   labs(x = "DP", y = "n") +
256   ggtitle("Histograma DP") +
257   geom_vline(xintercept = 1.0, size = 1, colour = "#FF3721", linetype = "dashed")

```

```

258 p + scale_fill_discrete(h = c(90, 210), c = 30, l = 50)
259
260
261 p2 <- ggplot(data_simul, aes(IPE, fill = cut(IPE, 100))) +
262   geom_histogram(show.legend = FALSE) +
263   theme_minimal() +
264   labs(x = "IPE", y = "n") +
265   ggtitle("Histograma IPE") +
266   geom_vline(xintercept = 1.0, size = 1, colour = "#FF3721", linetype = "dashed")
267
268 p2 + scale_fill_discrete(h = c(90, 210), c = 30, l = 50)
269
270
271 q <- ggplot(data_simul, aes(DP)) + stat_ecdf(geom = "step") +
272   ggtitle("Empirical Cumulative Density Function of DP") +
273   labs(x = "DP", y = "%") +
274   scale_y_continuous(breaks = seq(0, 1, 0.1), labels = seq(0,100,10)) +
275   geom_vline(xintercept = 1.0, size = 1, colour = "#FF3721", linetype = "dashed")
276
277 q
278
279 q2 <- ggplot(data_simul, aes(IPE)) + stat_ecdf(geom = "step") +
280   ggtitle("Empirical Cumulative Density Function of IPE") +
281   labs(x = "IPE", y = "%") +
282   scale_y_continuous(breaks = seq(0, 1, 0.1), labels = seq(0,100,10)) +
283   geom_vline(xintercept = 1.0, size = 1, colour = "#FF3721", linetype = "dashed")
284
285 q2
286
287 print(describe(data_simul$DP))
288
289 vals_dp <- quantile(data_simul$DP, probs = percnts/100)
290
291 tab_dp <- data.frame(Percentile = percnts/100, Values = vals_dp)
292 print(tab_dp)
293
294 dp_05 <- quantile(data_simul$DP, probs = 0.05)
295 dp_95 <- quantile(data_simul$DP, probs = 0.95)
296
297 hist(data_simul$DP, breaks = 100, main = "DP Distribution", xlab = "DP")
298 abline(v = dp_05, col = "black", lwd = 2, lty = 2)
299 abline(v = dp_95, col = "black", lwd = 2, lty = 2)
300
301
302 print(describe(data_simul$IPE))
303
304 vals_ipe <- quantile(data_simul$IPE, probs = percnts/100)
305
306 tab_ipe <- data.frame(Percentile = percnts/100, Values = vals_ipe)
307 print(tab_ipe)
308
309 ipe_05 <- quantile(data_simul$IPE, probs = 0.05)
310 ipe_95 <- quantile(data_simul$IPE, probs = 0.95)
311
312 hist(data_simul$IPE, breaks = 100, main = "IPE Distribution", xlab = "IPE")
313 abline(v = ipe_05, col = "black", lwd = 2, lty = 2)
314 abline(v = ipe_95, col = "black", lwd = 2, lty = 2)

```

Bibliografía

- [1] Acebes F, Pajares J, Galán JM, López-Paredes A (2014) A new approach for project control under uncertainty. Going back to the basics. *International Journal of Project Management* 32:423-434.
- [2] Alleman GB, Coonce TJ, Price RA (2018) What is Risk?. College of Performance Management, *The Measurable News* 1:25-34.
- [3] Bennett N, Lemoine J (2014) What a difference a word makes: Understanding threats to performance in a VUCA world. *Business horizons* 57:311-317.
- [4] Böhle F, Heidling E, Schoper YG (2016) Coping Better with the Projects Unknown Unknowns. En: Bodea C, Purnus A, Huemann M (ed) *Managing Project Risks for Competitive Advantage in Changing Business Environments*. IGI Global, Pennsylvania.
- [5] Burke R (2013) *Project Management: Planning and Control Techniques*. John Wiley and Sons Inc, New York.
- [6] Carnell R (2022) triangle: Distribution Functions and Parameter Estimates for the Triangle Distribution. R package version 1.0, <https://CRAN.R-project.org/package=triangle>. Accedido 2 de diciembre de 2023.
- [7] Creemers S, Demeulemeester E, Van de Vonder S (2014) A new approach for quantitative risk analysis. *Annals of Operations Research* 213:27-65.
- [8] Dosantos JCG (2022) *Management of Deterministic and Stochastic Projects*. Tesis, Universidade da Coruña.
- [9] Dosantos JCG, Jurado IG, Costa J (2022) *ProjectManagement: Management of Deterministic and Stochastic Projects*. R package version 1.4.7, <https://CRAN.R-project.org/package=ProjectManagement>. Accedido 2 de abril de 2023.
- [10] Edwards P, Bowen P (2013) *Risk Management in Project Organisations*. Routledge, London.
- [11] Hamby DM (1994) A review of techniques for parameter sensitivity analysis of environmental models. *Environmental Monitoring and Assessment* 32:135-154.
- [12] Helton JC, Davis FJ (2003) Latin hypercube sampling and the propagation of uncertainty in analyses of complex systems. *Reliability Engineering and System Safety* 81:23-69.

- [13] Hillson D (2004) Earned value management and risk management: a practical synergy. Paper presented at PMI® Global Congress 2004. Newtown Square, PA: Project Management Institute. <https://www.pmi.org/learning/library/earned-value-risk-management-competence-8296>. Accedido 5 de junio de 2023.
- [14] Kerzner H (2013) Project management: A systems approach to planning, scheduling and controlling. John Wiley and Sons, New Jersey.
- [15] Lumivero (2023) Lumivero. <https://lumivero.com>. Accedido 2 de febrero de 2023.
- [16] Oracle (2023) Oracle. <https://www.oracle.com>. Accedido 2 de febrero de 2023.
- [17] Pannell DJ (1997) Sensitivity analysis of normative economic models: theoretical framework and practical strategies. *Agricultural Economics* 16:139-152.
- [18] Pelz PF, Kersting S, Kohler M, Matei A, Melz T, Platz R, Pfetsch ME, Schaeffner M, Ulbrich S (2021) Types of Uncertainty. En: Pelz PF, Groche P, Pfetsch ME, Schaeffner M (ed) *Mastering Uncertainty in Mechanical Engineering*. Springer International Publishing, Cham, pp 25-42.
- [19] Project Management Institute (2017) A guide to the project management body of knowledge (PMBOK® guide) (6th ed.). Project Management Inst, Pennsylvania.
- [20] Project Management Institute (2021) Beyond Agility: Flex to the future. Pulse of the Profession <http://www.cran.r-project.org/package=NPCirc>. Accedido 4 de mayo de 2023.
- [21] Salles Jr CA, Soler AM, do Valle JAS, Rabechini Jr R (2010) *Série Gerenciamento de Projetos: Gerenciamento de riscos em projeto*, 2ª ed. FGV Editora, Rio de Janeiro.
- [22] Savage SL (2012) *The Flaw of Averages: Why We Underestimate Risk in the Face of Uncertainty*. John Wiley and Sons Ltd, West Sussex.
- [23] Shenhar AJ, Dvir D (2007) *Reinventing project management: The diamond approach to successful growth and innovation*. Harvard Business School Publishing, Boston.
- [24] Vanhoucke M (2015) *Integrated Project Management and Control: First Comes the Theory, then the Practice*. Springer.
- [25] Vose D (2008) *Risk analysis: A quantitative guide*. John Wiley and Sons Ltd, West Sussex.
- [26] Vose (2023) Vose Software. <https://www.vosesoftware.com>. Accedido 2 de febrero de 2023.
- [27] Williams T (1992) Practical Use of Sensitivity Analysis in Project Risk Management. *International Journal of Project Management*, 10(4), 273-278.

[28] Zarikas V, Kitsos CP (2015) Risk Analysis with Reference Class Forecasting Adopting Tolerance Regions. En: Kitsos CP, Oliveira TA, Rigas A, Gulati S (Ed) Theory and Practice of Risk Assessment. Springer International Publishing, Cham, pp 235-247.