



Universidad de Valladolid

Análisis de la correlación entre actividades y su impacto en la duración de proyectos.



Diego Hortigüela Arozamena

MÁSTER EN DIRECCIÓN DE PROYECTOS
Departamento De Organización De Empresas Y C.I.M.
Universidad De Valladolid
España

INSISOC
SOCIAL SYSTEMS
ENGINEERING CENTRE
2023



Universidad de Valladolid

Análisis de la correlación entre actividades y su impacto en la duración de proyectos.

Diego Hortigüela Arozamena

MÁSTER EN DIRECCIÓN DE PROYECTOS
Departamento De Organización De Empresas Y C.I.M.
Universidad De Valladolid

Valladolid, Julio 2023

Tutor
Fernando Acebes Senovilla

AGRADECIMIENTOS

Deseo expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas que han contribuido a la exitosa realización de este trabajo, poniendo fin a una etapa académica muy completa.

En primer lugar, agradecer a Fernando Acebes, su apoyo y orientación durante la investigación. También al grupo de investigación INSISOC, especialmente a Javier Pajares, cuyo trabajo previo fue una ayuda e inspiración para la realización de este TFM.

Además, quiero agradecer a mis compañeros de clase, tanto del máster como de la carrera en Ingeniería en Organización Industrial, por haber compartidos tantos años, y haberme ayudado a mejorar en cada etapa.

Por último, agradecer a mi familia, por el apoyo, la comprensión, y las oportunidades que me han brindado.

Gracias a todos por formar parte de este viaje académico.

Diego Hortigüela Arozamena

RESUMEN

La gestión efectiva de proyectos requiere considerar la duración del proyecto como factor clave, pudiendo ser influenciada por las correlaciones entre actividades. En este estudio, se analizan los indicadores de sensibilidad para medir la importancia de las actividades en el proyecto y se investiga cómo la correlación entre ellas puede influir en estos indicadores. Existen investigaciones aisladas sobre la correlación entre actividades y los indicadores de sensibilidad, pero este Trabajo Fin de Máster busca contribuir al conocimiento existente planteando la combinación de la correlación entre actividades, y su influencia en los indicadores de sensibilidad. Se utiliza la simulación de Monte Carlo para explorar diferentes escenarios, teniendo en cuenta la incertidumbre en las duraciones de las actividades, buscando evaluar el impacto de la correlación entre actividades en la duración del proyecto. Los resultados obtenidos permitirán obtener una visión más realista de la importancia relativa de cada actividad en el contexto del proyecto.

Palabras Clave

Correlación de actividades, índices de sensibilidad, duración del proyecto, simulación de Monte Carlo y dirección de proyectos.

ABSTRACT

Effective project management requires considering project duration as a key factor, which can be influenced by correlations between activities. This study analyzes sensitivity indicators to measure the importance of activities in the project and investigates how the correlation between them can influence these indicators. While there are isolated research studies on the correlation between activities and sensitivity indicators, this Master's thesis aims to contribute to existing knowledge by proposing the combination of activity correlation and its influence on sensitivity indicators. Monte Carlo simulation is employed to explore different scenarios, considering the uncertainty in activity durations, seeking to evaluate the impact of the correlation between activities on the project duration. The results obtained will provide a more realistic understanding of the relative importance of each activity within the project context.

Keywords

Activity correlation, sensitivity indexes, project duration, Monte Carlo simulation y project management.

ÍNDICE DE CONTENIDO

Capítulo 1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 Objetivo del Proyecto	1
1.2 Alcance del Proyecto	2
1.3 Motivación del Proyecto	2
1.4 Estructura del Documento	2
Capítulo 2 SCHEDULING RISK ANALYSIS (SRA).....	5
2.1 Introducción a la técnica	5
2.1.1. Análisis de riesgos.....	5
2.1.2. Técnica SRA	6
2.2 Fundamentos de la técnica	6
2.2.1. Conceptos clave.....	7
2.2.2. Pasos a seguir.	8
2.2.3. Interpretación de los resultados obtenidos	10
2.3 Indicadores de sensibilidad	10
2.3.1. Introducción	10
2.3.2. Criticidad.....	11
2.3.3. Schedule Sensitivity Index (SSI).....	12
2.3.4. Crucialidad	13
2.3.5. Cálculo e interpretación de las variables de sensibilidad.....	14
2.4 Ventajas y limitaciones	15
2.4.1. Ventajas	15
2.4.2. Limitaciones	16
2.4.3. Estrategias para mitigar las limitaciones.....	17
Capítulo 3 CORRELACIÓN	19
3.1 Correlaciones entre actividades	19
3.2 Tipos de correlación.....	20
3.2.1. Formas de correlación	21
3.2.2. Tipos de correlación	23
3.3 Métodos de análisis de la correlación	25
3.4 Impacto en la duración del proyecto	26
3.5 Trabajos donde estudian correlación en situaciones reales.....	26

Capítulo 4 MÉTODO DE ESTUDIO	29
4.1 Introducción.....	29
4.2 Relación entre los indicadores de sensibilidad y correlación.....	30
4.3 Definición de la red de proyecto.....	31
4.4 Definición del estudio.....	36
Capítulo 5 RESULTADOS Y ANÁLISIS	39
5.1 Camino crítico predominante.....	40
5.1.1. Distribución Normal.....	40
5.1.1.1 Correlación positiva.....	43
5.1.1.1.1 Resultados de la simulación.....	43
5.1.1.1.2 Indicadores de sensibilidad.....	45
5.1.1.2 Correlación negativa.....	47
5.1.1.2.1 Resultados de la simulación.....	47
5.1.1.2.2 Indicadores de sensibilidad.....	49
5.1.2. Distribución triangular.....	51
5.1.2.1 Correlación positiva.....	53
5.1.2.1.1 Resultados de la simulación.....	53
5.1.2.1.2 Indicadores de sensibilidad.....	55
5.1.2.2 Correlación negativa.....	57
5.1.2.2.1 Resultados de la simulación.....	57
5.1.2.2.2 Indicadores de sensibilidad.....	58
5.1.3. Estadísticos.....	61
5.2 Caminos de igual duración.....	65
5.2.1. Distribución normal.....	65
5.2.1.1 Correlación positiva.....	67
5.2.1.1.1 Resultados de la simulación.....	67
5.2.1.1.2 Indicadores de sensibilidad.....	69
5.2.1.2 Correlación negativa.....	71
5.2.1.2.1 Resultados de la simulación.....	72
5.2.1.2.2 Indicadores de sensibilidad.....	73
5.2.2. Distribución triangular.....	76
5.2.2.1 Correlación positiva.....	78
5.2.2.1.1 Resultados de la simulación.....	78
5.2.2.1.2 Indicadores de sensibilidad.....	79
5.2.2.2 Correlación negativa.....	82
5.2.2.2.1 Resultados de la simulación.....	82
5.2.2.2.2 Indicadores de sensibilidad.....	83
5.2.3. Estadísticos.....	86

Capítulo 6 CONCLUSIONES	91
Capítulo 7 BIBLIOGRAFÍA	93

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Grafo de proyecto con actividades relacionadas. Fuente: (Poza, 2021).....	7
Ilustración 2. Pasos del Análisis de Riesgos de Programación (SRA). Fuente: Vanhoucke (2013).....	9
Ilustración 3. Gráfico de variables de sensibilidad. Fuente: Elaboración propia.....	15
Ilustración 4. Correlación positiva. Fuente: Elaboración propia.	22
Ilustración 5. Correlación negativa. Fuente: Elaboración propia.	22
Ilustración 6. Correlación nula. Fuente: Elaboración propia.	23
Ilustración 7. Correlación lineal y positiva. Fuente: Elaboración propia.	24
Ilustración 8. Correlación no lineal y positiva. Fuente: Elaboración propia.	25
Ilustración 9. Correlación no lineal y positiva. Fuente: Elaboración propia.	25
Ilustración 10. Diagrama AON del proyecto. Fuente: Elaboración propia.	31
Ilustración 11. Ejemplo de simulación de Monte Carlo. Fuente: @Risk (Elaboración propia).....	37
Ilustración 12. Red de proyecto. Camino crítico dominante - Funciones de distribución normal.	41
Ilustración 13. Actividades función distribución normal. Fuente: @Risk.....	41
Ilustración 14. Función de distribución proyecto. Camino crítico dominante, funciones de distribución normal. Fuente: @Risk.....	42
Ilustración 15. Estadísticos. Camino crítico dominante, funciones de distribución normal sin correlación. Fuente: @Risk.....	42
Ilustración 16. Distribución normal. Correlación positiva A1-A2.	44
Ilustración 17. Distribución normal. Correlación positiva A1-A3.	44
Ilustración 18. Distribución normal. Correlación positiva A1-A4.	45
Ilustración 19. Índice de Criticidad. Camino dominante, distribución normal, correlación positiva.....	46
Ilustración 20. Índice de Crucialidad. Camino dominante, distribución normal, correlación positiva.....	46
Ilustración 21. SSI. Camino dominante, distribución normal, correlación positiva.....	47
Ilustración 22. Distribución normal. Correlación negativa A1-A2.	48
Ilustración 23. Distribución normal. Correlación negativa A1-A3.	48
Ilustración 24. Distribución normal. Correlación negativa A1-A4.	49
Ilustración 25. Índice de Criticidad. Camino dominante, distribución normal, correlación negativa.....	50
Ilustración 26. Índice de Crucialidad. Camino dominante, distribución normal, correlación negativa.....	50
Ilustración 27. SSI. Camino dominante, distribución normal, correlación negativa.....	51
Ilustración 28. Red de proyecto. Camino crítico dominante - Funciones de distribución triangular.....	51
Ilustración 29. Actividades función distribución triangular. Fuente: @Risk.	52

Ilustración 30. Función de distribución proyecto. Camino crítico dominante, funciones de distribución triangular. Fuente: @Risk.....	52
Ilustración 31. Estadísticos. Camino crítico dominante, funciones de distribución triangular sin correlación. Fuente: @Risk.....	53
Ilustración 32. Distribución triangular. Correlación positiva A1-A2.....	54
Ilustración 33. Distribución triangular. Correlación positiva A1-A3.....	54
Ilustración 34. Distribución triangular. Correlación positiva A1-A4.....	54
Ilustración 35. Índice de Criticidad. Camino dominante, distribución triangular, correlación positiva.....	55
Ilustración 36. Índice de Crucialidad. Camino dominante, distribución triangular, correlación positiva.....	56
Ilustración 37. SSI. Camino dominante, distribución triangular, correlación positiva.	56
Ilustración 38. Distribución triangular. Correlación negativa A1-A2.....	57
Ilustración 39. Distribución triangular. Correlación negativa A1-A3.....	58
Ilustración 40. Distribución triangular. Correlación negativa A1-A4.....	58
Ilustración 41. Índice de Criticidad. Camino dominante, distribución triangular, correlación negativa.....	59
Ilustración 42. Índice de Crucialidad. Camino dominante, distribución triangular, correlación negativa.....	60
Ilustración 43. SSI. Camino dominante, distribución triangular, correlación negativa.....	60
Ilustración 44. Camino dominante. Media de las simulaciones.	61
Ilustración 45. Camino dominante. Percentil 95.	63
Ilustración 46. Camino dominante. Desviación estándar de las simulaciones.	63
Ilustración 47. Camino dominante. Asimetría de las simulaciones.....	64
Ilustración 48. Camino dominante. Curtosis de las simulaciones.	64
Ilustración 49. Red de proyecto. Caminos iguales - Funciones de distribución normal. ..	65
Ilustración 50. Actividades función distribución normal. Fuente: @Risk.	65
Ilustración 51. Función de distribución proyecto. Caminos iguales, funciones de distribución normal. Fuente: @Risk.....	66
Ilustración 52. Estadísticos. Caminos iguales, funciones de distribución normal sin correlación. Fuente: @Risk.	67
Ilustración 53. Distribución normal. Correlación positiva A1-A2.....	68
Ilustración 54. Distribución normal. Correlación positiva A1-A3.....	68
Ilustración 55. Distribución normal. Correlación positiva A1-A4.....	69
Ilustración 56. Índice de Criticidad. Caminos iguales, distribución normal, correlación positiva.....	70
Ilustración 57. Índice de Crucialidad. Caminos iguales, distribución normal, correlación positiva.....	71
Ilustración 58. SSI. Caminos iguales, distribución normal, correlación positiva.....	71
Ilustración 59. Distribución normal. Correlación negativa A1-A2.....	72
Ilustración 60. Distribución normal. Correlación negativa A1-A3.....	73
Ilustración 61. Distribución normal. Correlación negativa A1-A4.....	73

Ilustración 62. Índice de Criticidad. Caminos iguales, distribución normal, correlación negativa.....	74
Ilustración 63. Índice de Crucialidad. Caminos iguales, distribución normal, correlación negativa.....	75
Ilustración 64. SSI. Caminos iguales, distribución normal, correlación negativa.....	75
Ilustración 65. Red de proyecto. Caminos iguales- Funciones de distribución triangular.....	76
Ilustración 66. Actividades función distribución triangular. Fuente: @Risk.....	76
Ilustración 67. Función de distribución proyecto. Caminos iguales, funciones de distribución triangular. Fuente: @Risk.....	77
Ilustración 68. Estadísticos. Caminos iguales, funciones de distribución triangular sin correlación. Fuente: @Risk.....	77
Ilustración 69. Distribución triangular. Correlación positiva A1-A2.....	78
Ilustración 70. Distribución triangular. Correlación positiva A1-A3.....	79
Ilustración 71. Distribución triangular. Correlación positiva A1-A4.....	79
Ilustración 72. Índice de Criticidad. Caminos iguales, distribución triangular, correlación positiva.....	80
Ilustración 73. Índice de Crucialidad. Caminos iguales, distribución triangular, correlación positiva.....	81
Ilustración 74. SSI. Caminos iguales, distribución triangular, correlación positiva.....	81
Ilustración 75. Distribución triangular. Correlación negativa A1-A2.....	82
Ilustración 76. Distribución triangular. Correlación negativa A1-A3.....	83
Ilustración 77. Distribución triangular. Correlación negativa A1-A4.....	83
Ilustración 78. Índice de Criticidad. Caminos iguales, distribución triangular, correlación negativa.....	84
Ilustración 79. Índice de Crucialidad. Caminos iguales, distribución triangular, correlación negativa.....	85
Ilustración 80. SSI. Caminos iguales, distribución triangular, correlación negativa.....	85
Ilustración 81. Caminos iguales. Media de las simulaciones.....	86
Ilustración 82. Caminos iguales. Percentil 95.....	87
Ilustración 83. Caminos iguales. Desviación estándar de las simulaciones.....	88
Ilustración 84. Caminos iguales. Asimetría de las simulaciones.....	88
Ilustración 85. Caminos iguales. Curtosis de las simulaciones.....	89

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Actividades y relación de precedencia. Fuente: Elaboración propia.	31
Tabla 2. Resumen de escenarios.	32
Tabla 3. Escenario 1. Caso 1. Duración de actividades según distribución normal.	33
Tabla 4. Camino dominante. Función de distribución normal.	33
Tabla 5. Escenario 1. Caso 2. Duración de actividades según distribución triangular.	34
Tabla 6. Camino dominante. Función de distribución triangular.	34
Tabla 7. Escenario 2. Caso 1. Duración de actividades según distribución normal.	35
Tabla 8. Caminos iguales. Función de distribución normal.	35
Tabla 9. Escenario 2. Caso 2. Duración de actividades según distribución triangular.	35
Tabla 10. Caminos iguales. Función de distribución triangular.	36
Tabla 11. Camino crítico, ejemplo de simulación. Fuente: @Risk (Elaboración propia). 37	
Tabla 12. Ejemplo de medición de variables de sensibilidad. Fuente: @Risk (Elaboración propia).	38
Tabla 13. Resumen de escenarios.	40
Tabla 14. Leyenda de las ilustraciones con indicadores de sensibilidad.	45
Tabla 15. Leyenda de las ilustraciones con indicadores de sensibilidad.	69

Capítulo 1 INTRODUCCIÓN

La gestión efectiva de proyectos es un factor crucial para lograr resultados exitosos. Entre los factores fundamentales que los gestores de proyectos deben tener en cuenta para planificar adecuadamente las actividades, se encuentra la duración del proyecto. Esta duración se obtiene como la suma de las duraciones de todas las actividades que lo componen. Sin embargo, en la práctica, estas actividades no suelen ser independientes, sino que están correlacionadas entre sí, y dichas correlaciones pueden tener un impacto significativo en la duración total del proyecto.

En este trabajo de investigación, nos centramos en analizar la correlación entre actividades, y su impacto en la duración del proyecto. En particular, exploramos cómo la correlación entre actividades puede influir en los indicadores de sensibilidad, los cuales miden la importancia de las actividades del proyecto.

En dirección de proyectos es común considerar las actividades independientes dentro de la red, pero existen circunstancias que pueden provocar cierta dependencia (correlación) entre unas actividades y otras. Menos común es encontrar en la literatura documentación que analice o estudie el impacto de la correlación entre las actividades del proyecto y los indicadores de sensibilidad de las actividades. Aunque se han estudiado los indicadores de sensibilidad de forma independiente casi no existen estudios sobre la correlación entre actividades, y los pocos que existen llegan a la conclusión de que el valor medio de la duración del proyecto no cambia. Dentro del GIR Insisoc surge una primera investigación de la mano del Dr. Javier Pajares, donde se analiza superficialmente el impacto de la correlación entre actividades sobre sus indicadores de sensibilidad, y también se incluye como línea de investigación en su plaza de promoción a Catedrático de Universidad (Pajares et al., 2022). Estos indicadores son vitales en la gestión de proyectos, ya que cuantifican la influencia de cada actividad en la duración total del proyecto.

A través de esta investigación, buscamos contribuir al conocimiento existente en el campo de la gestión de proyectos ampliando los estudios previos realizados dentro del GIR Insisoc por (Pajares et al., 2022). Además de proporcionar información sobre cómo puede influir la correlación entre actividades en los indicadores de sensibilidad. Al combinar ambos aspectos, podremos obtener una visión más realista de la importancia relativa de cada actividad en el contexto del proyecto.

1.1 Objetivo del Proyecto

El objetivo principal de este trabajo de investigación es analizar cómo la correlación entre actividades puede o no puede afectar a los indicadores de sensibilidad de la duración del proyecto. Considerando un entorno con incertidumbre, se busca explorar diferentes tipos de correlación, y comprender cómo influyen en la duración total del proyecto. Para ello, se van a crear varios escenarios en los que se modela la incertidumbre en la duración de las actividades mediante distintas funciones de distribución, y analizar los resultados obtenidos en cada uno.

1.2 Alcance del Proyecto

El alcance de este trabajo se centra en el análisis de la correlación entre actividades y su impacto en la duración de proyectos. Para ello, se estudiará cómo la correlación entre las actividades puede afectar a los indicadores de sensibilidad, que miden la importancia de las actividades en el proyecto. Se crearán distintos escenarios, considerando en todos los casos un entorno con incertidumbre, que será modelada a través de distintas funciones de distribución dependiendo del escenario. Esto nos permitirá analizar y comparar los resultados obtenidos en cada caso, y evaluar el impacto de la correlación en la duración total del proyecto. También, se calcularán los valores de determinados estadísticos, como la media, la desviación estándar, curtosis etc. y de los indicadores de sensibilidad, para cada escenario, mediante la utilización de la simulación de Monte Carlo, con el objetivo de conocer la influencia de la correlación en la importancia relativa de las actividades para el proyecto.

1.3 Motivación del Proyecto

La motivación para llevar a cabo este Trabajo de Fin de Máster surge de la necesidad de abordar un aspecto poco explorado en la gestión de proyectos, como es la influencia de las correlaciones entre actividades en la duración del proyecto. A pesar de la importancia de gestionar la duración del proyecto, y sabiendo de la influencia que la existencia de correlaciones entre actividades puede tener en la misma, su consideración no ha sido ampliamente abordada en la literatura existente. El hecho de subestimar el impacto de las correlaciones entre actividades puede ocasionar desviaciones en los cronogramas y modificación en los indicadores de sensibilidad. Por eso se ha querido estudiar si realmente se ven afectados o no, cuáles, y en qué medida, en relación con los cambios en las correlaciones entre actividades.

Este trabajo surge de una investigación previa realizada dentro del GIR Insisoc, dirigida por el investigador Dr. Javier Pajares, cuyo trabajo fue presentado en un congreso de Ingeniería y Dirección de Proyectos (Pajares et al., 2022). Además, esta línea de investigación se alinea con una de las líneas planteadas por el Catedrático de Universidad, Dr. Javier Pajares, durante la defensa de su Cátedra. Por ello, la oportunidad de profundizar en este tema y contribuir al conocimiento existente en dicha línea de investigación ha sido un impulso para desarrollar este TFM.

1.4 Estructura del Documento

El trabajo se estructurará de la siguiente manera, en el Capítulo 2, se proporciona una introducción a la técnica SRA en la programación de proyectos, incluyendo conceptos clave. En el siguiente capítulo, el Capítulo 3, se exploran los diferentes tipos de correlación que pueden existir entre actividades, y se indica cómo pueden influir en la duración total del proyecto. También se revisan los métodos de análisis de la correlación y se introduce el posible impacto que puede tener la correlación en la duración del proyecto. A continuación, en el Capítulo 4, se detalla el método de estudio utilizado en el trabajo para

analizar la correlación entre actividades y su impacto en la duración del proyecto, se describen las relaciones entre indicadores de sensibilidad y la correlación, y se introduce la red del proyecto. Posteriormente, en el Capítulo 5, se presentan los resultados del análisis realizado con @Risk, donde se estudian los efectos de los tipos de correlación considerando diferentes escenarios. Por último, en el Capítulo 6, se exponen las conclusiones de la investigación, destacando los hallazgos más relevantes sobre la correlación entre actividades y su impacto en la duración de los proyectos.

Capítulo 2 SCHEDULING RISK ANALYSIS (SRA)

En el ámbito de la dirección de proyectos, el análisis de riesgos desempeña un papel fundamental para asegurar el éxito en la ejecución de los proyectos. Uno de los aspectos clave del análisis de riesgos es la evaluación del impacto que tiene la incertidumbre en la duración de las actividades sobre el proyecto (Chapman & Ward, 2003). En este contexto, se presenta la técnica *Scheduling Risk Analysis* (SRA), como una herramienta que se utiliza para evaluar y gestionar la incertidumbre asociada a la duración de las actividades de un proyecto (Project Management Institute, 2017).

El objetivo de este capítulo es comprender la técnica SRA, y su aplicación en la gestión de proyectos.

La estructura que se va a seguir en este capítulo es, en primer lugar, una visión general de la técnica, seguida de un estudio más exhaustivo con los fundamentos y conceptos clave. A continuación, se introducirán las variables de sensibilidad, y, por último, las ventajas e inconvenientes.

2.1 Introducción a la técnica

A continuación, se presenta una descripción general del análisis de riesgos, y de la técnica SRA, que se enmarca en dicho contexto, y su relevancia para la gestión de proyectos, y para la toma de decisiones informadas, utilizando variables de sensibilidad.

2.1.1. Análisis de riesgos

Según PMBOK (Project Management Body of Knowledge), una de las referencias más utilizadas en el ámbito de la dirección de Proyectos, ‘Riesgo’ se define como un evento o condición incierta, que, en caso de ocurrir, puede tener un impacto positivo o negativo sobre alguno de los objetivos del proyecto (Project Management Institute, 2017). La gestión de riesgos implica identificar, analizar, y evaluar los riesgos, y planificar las respuestas para abordarlos, es decir, las amenazas u obstáculos que puedan frenar el avance de la implementación del plan de proyecto (University, s.f.)

El análisis de riesgos es por tanto un proceso de toma de decisiones para manejar la incertidumbre derivada de las acciones que puedan tener un impacto en el proyecto (Workmeter, s.f.), siendo un apartado vital de la dirección de proyectos.

El proceso de identificación de riesgos se realiza mediante técnicas como *brainstorming* (tormenta de ideas, técnica grupal que permite obtener muchas ideas sobre determinado tema de estudio (Luna Maldonado & Legaz Pérez, 2014)), análisis de lecciones aprendidas, análisis de datos históricos o mediante la consulta a expertos. Lo que pretende es reconocer todos aquellos sucesos que puedan tener un impacto positivo (oportunidad) o negativo (amenaza) en el proyecto, para explotar o mitigar sus consecuencias.

Una vez identificados los eventos de riesgo, se evalúan y se clasifican en función de su probabilidad e impacto, es lo que se conoce como análisis cualitativo. Por otro lado, el análisis cuantitativo utiliza modelos matemáticos para asignar valores numéricos a los riesgos y calcular su impacto (Yazar, 2002).

2.1.2. Técnica SRA

A continuación, se presenta la técnica SRA. El nombre proviene del inglés, donde las siglas significan *Scheduling Risk Analysis*, es decir, traducido al español, Análisis de Riesgos de Programación. Esta técnica se utiliza en la gestión de proyectos para la identificación, evaluación y cuantificación de los posibles riesgos que pueden afectar a la programación del proyecto, con el objetivo de tomar medidas preventivas o correctivas para minimizar su impacto (Acebes, et al., 2020).

En el Análisis de Riesgos de Programación (SRA), se considera que las duraciones de las actividades, y las relaciones entre las mismas, poseen incertidumbre, y trata de modelarla utilizando técnicas estadísticas y simulación. La simulación de Monte Carlo, como se verá en un capítulo posterior, es una de las herramientas más utilizadas para generar duraciones aleatorias de actividades teniendo en cuenta las funciones de distribución de probabilidad de cada una.

El método del camino crítico tradicional, no considera la incertidumbre de las actividades, es decir, utiliza actividades de duración fija para la programación del proyecto. Esto no representa la realidad de los sistemas y proyectos cotidianos, donde la duración de las actividades está sujeta a incertidumbre, por lo tanto, la utilización del método del camino crítico puede llevar a equivocación, por sus predicciones optimistas. Por ello, surge la necesidad de medir la sensibilidad del proyecto, que también proporciona la habilidad de predecir la fecha de su finalización durante su ejecución (Vanhoucke, 2013).

Precisamente se conoce como SRA al hecho de medir los indicadores de sensibilidad de las actividades del proyecto. En ocasiones, esta técnica es considerada una extensión de las conocidas PERT y CPM, pero en condiciones de incertidumbre (Kerzner, 2017).

El objetivo de la técnica SRA es proporcionar una visión más realista de la planificación de las actividades (cronograma) al tener en cuenta la incertidumbre a la que están sujetas (Ballesteros-Pérez, et al., 2019). Haciendo esto, se permite evaluar con mayor exactitud los posibles retrasos o desviaciones que puedan surgir en la ejecución del cronograma, así como identificar los riesgos asociados. Esta técnica pretende mejorar la toma de decisiones, proporcionando información más realista sobre la duración de las actividades, y por ende, del proyecto, al gestor del proyecto.

2.2 Fundamentos de la técnica

En este punto se va a profundizar en los fundamentos de la técnica SRA y en su aplicación en el contexto de la gestión de proyectos. Se introducirán los conceptos de análisis de redes, estimaciones de duración y simulación de Monte Carlo. Además, se mostrarán los pasos

para llevar a cabo un Análisis de Riesgos de Programación exitoso, y se describirá la forma de utilizar esta técnica para evaluar el impacto de los riesgos en el cronograma.

2.2.1. Conceptos clave

En este subapartado, se explorarán los conceptos clave de la técnica SRA, como son el análisis de redes de tareas, las estimaciones de duración de las actividades, y la simulación de Monte Carlo.

En primer lugar, se aborda el análisis de redes, que es una herramienta fundamental en la dirección de proyectos. El objetivo de esta herramienta es ayudar a la visualización y comprensión del trabajo a realizar, analizando el flujo de trabajo, incluidas sus dependencias, identificando la ruta crítica y ayudando, por tanto, a planificar, coordinar, y controlar la ejecución del proyecto (Ilustración 1). Para ello se utilizarán diagramas de red, o por ejemplo el diagrama de Gantt, permitiendo representar las actividades del proyecto, obedeciendo a las relaciones de precedencia entre ellas, e identificando el camino crítico del proyecto (Kerzner, 2017)

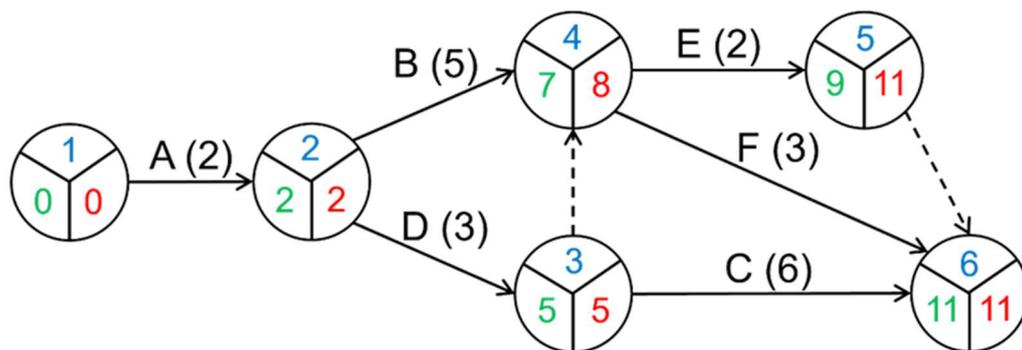


Ilustración 1. Grafo de proyecto con actividades relacionadas. Fuente: (Poza, 2021)

En segundo lugar, también son un concepto clave de la técnica SRA, las estimaciones de duración de las actividades del proyecto. Una correcta estimación de la duración de las actividades, permite desarrollar un cronograma, y establecer las fechas de comienzo y finalización de las mismas. Para realizar dicha estimación, se utilizarán diferentes métodos, entre los que cabe destacar, la estimación basada en la experiencia, la estimación paramétrica, o la estimación por tres puntos. Tal y como se ha adelantado anteriormente, se considera que la duración de las actividades no es fija, y posee incertidumbre, la cual se modela mediante técnicas estadísticas y simulación.

Por último, otro fundamento clave de la técnica SRA es la simulación de Monte Carlo, utilizada para modelar la incertidumbre en la duración de las actividades del proyecto. La simulación de Monte Carlo es una técnica estadística cuantitativa, que combina aleatoriedad y determinismo y que a partir de números aleatorios permite resolver problemas matemáticos a los que no se les puede dar solución mediante algoritmos deterministas (Robert & Casella, 1999). En el ámbito de la dirección de proyectos, se utiliza para modelar y analizar la incertidumbre en las duraciones de los mismos, mediante la

creación de múltiples escenarios, a partir de un conjunto de valores de entrada fijos (Chapman & Ward, 2003).

Conviene remarcar que los resultados obtenidos con simulación de Monte Carlo son estimaciones de cómo se comportaría el sistema antes las condiciones iniciales dadas, pero no es un cálculo exacto. Al tratarse de un proceso iterativo, y para conseguir que los resultados sean significativos, se debe generar una cantidad de datos aleatorios lo suficientemente grande, y cuantas más iteraciones se realicen, mayor será la precisión de los resultados (Hortigüela Arozamena, 2022).

El proceso de simulación de Monte Carlo tiene los siguientes pasos (Vanhoucke, 2013).

- 1- Diseño del modelo – El primer paso a realizar, es identificar las variables de entrada relevantes en el cronograma del proyecto. Estas variables pueden incluir duraciones de las tareas, dependencias entre tareas, etc.
- 2- Definición de las distribuciones de probabilidad – Cada una de las variables de entrada identificadas en el punto anterior se definirá por una función de distribución que recoja las posibles duraciones de cada actividad, en cada simulación, en función de datos históricos, juicio de expertos etc.
- 3- Ejecución de la simulación – Generación de múltiples escenarios de proyecto al muestrear aleatoriamente los valores de las variables de entrada según sus distribuciones de probabilidad. En cada simulación se obtiene un valor de salida como resultado final, que será, en este caso, la duración total del proyecto.
- 4- Repetición – Hasta tener una muestra estadísticamente significativa, que nos permita obtener una función de distribución del proyecto, representativa de la realidad. A mayor cantidad de iteraciones realizadas, más significativa será la función de distribución obtenida, que se obtiene también realizando pocas iteraciones, pero deformada y sin resultados consistentes.
- 5- Cálculo de estadísticos – Calcular los más importantes, entre los que cabe destacar la media, la desviación estándar, intervalos de confianza etc.
- 6- Análisis de resultados – Examinar y evaluar los resultados obtenidos, tanto la función de distribución de la duración total del proyecto, como los indicadores de sensibilidad, para poder centrar esfuerzos en aquellas actividades que supongan mayor riesgo para el proyecto.

2.2.2. Pasos a seguir.

Llevar a cabo exitosamente la técnica SRA implica la realización de los pasos que se muestran a continuación en la Ilustración 2 (Hulett, 1996).

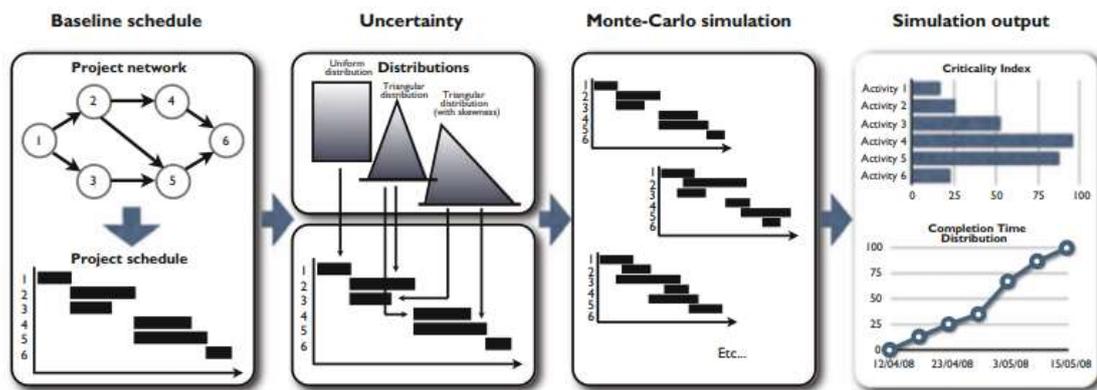


Ilustración 2. Pasos del Análisis de Riesgos de Programación (SRA). Fuente: Vanhoucke (2013)

1- Fase de programación (*Baseline Scheduling*).

- Construir la línea base de programación inicial, que sirve como punto de referencia para medir el progreso real del proyecto.
- Se identifican las actividades, las relaciones entre ellas, y los tiempos estimados de cada actividad.
- Generalmente se acepta que hay escasa probabilidad de que la realidad del proyecto coincida con lo planificado, aun así, el cronograma de referencia es clave para poder medir el avance del proyecto, así como para el análisis de riesgos de programación.

2- Definición de la incertidumbre.

- En este paso se identifican las fuentes de incertidumbre que pueden afectar a las actividades.
- La disponibilidad de recursos, la posibilidad de retrasos o variabilidad en la duración de la actividad durante su ejecución etc. Esta incertidumbre se modela mediante funciones de distribución.

3- Simulación de Monte Carlo.

- Ejecución de la simulación de Monte Carlo para estudiar el avance del proyecto, obteniendo escenarios distintos en cada iteración, con valores diferentes de las duraciones de las actividades en función de las distribuciones de probabilidad definidas previamente.

4- Medida de los indicadores de sensibilidad.

- De cada escenario simulado se conocen todas las programaciones de proyecto, las rutas críticas etc. que se utilizarán para poder medir el grado de sensibilidad de las actividades en el proyecto.
- Entre las variables de sensibilidad medidas, cabe destacar: Índice de Criticidad (CI), Índice de Sensibilidad de Programación (SSI) e Índice de Crucialidad (CRI). Serán especificadas más a fondo en el subapartado 2.3 Indicadores de sensibilidad.
- Cada variable aporta información sobre qué tan sensible es la actividad a la duración final del proyecto. Los valores de estas variables de sensibilidad son significativos tras la simulación de todos los escenarios, y se usan para centrarse

en las actividades de mayor riesgo, que requieren mayor atención para no tener un impacto negativo en el proyecto.

2.2.3. Interpretación de los resultados obtenidos

La interpretación de resultados es esencial para obtener el objetivo que persigue esta técnica, que es proporcionar una planificación más realista del proyecto al tener en cuenta la incertidumbre en las estimaciones de la duración de las actividades. Además, la correcta interpretación de los resultados es lo que permite una eficaz toma de decisiones. Por ello, en este apartado se indicará cómo interpretar los resultados obtenidos tras aplicar la técnica SRA y cómo utilizarlos para una correcta toma de decisiones (Chapman & Ward, 2003).

Tras la utilización de la simulación de Monte Carlo, y de la generación de múltiples escenarios considerando incertidumbre en la duración de las actividades del proyecto, se obtiene una función de distribución de la variable de salida especificada, la duración total del proyecto. Esta función de distribución permite conocer la variabilidad y la probabilidad asociada con los posibles tiempos de finalización del proyecto.

Para la interpretación de resultados, se utilizan los indicadores de sensibilidad que permiten la identificación de actividades críticas, es decir, de aquellas con mayor impacto en la planificación del proyecto. Aquellas actividades con los índices de sensibilidad más altos serán las que mayor impacto potencial tienen para el proyecto (Project Management Institute, 2017).

2.3 Indicadores de sensibilidad

Las variables de sensibilidad desempeñan un papel muy importante, ya que son parámetros que ayudan a identificar aquellas actividades del proyecto que son más críticas y a las que por tanto hay que prestar mayor atención.

En este apartado se explorará la importancia de las variables de sensibilidad en el mencionado análisis de riesgos. También se investigarán las distintas variables de sensibilidad, junto con una explicación de como calcularlas y como interpretarlas.

2.3.1. Introducción

Los indicadores de sensibilidad permiten medir cómo afectan a las variables de salida de un proyecto, las modificaciones incrementales en las variables de entrada, es decir, permite identificar las variables de entrada más influyentes en el cronograma del proyecto. Para averiguar qué actividades o riesgos tienen un impacto significativo se utilizan medidas como la criticidad, la crucialidad o el SSI (Chapman & Salkheld, 2013).

Las actividades de los proyectos tienen duración aleatoria, modelada, según se ha expuesto, mediante funciones de distribución de probabilidad, y con la utilización de la simulación de Monte Carlo, se obtienen funciones de probabilidad de la duración total del proyecto.

El hecho de que las actividades tengan duración aleatoria hace que al desarrollar las simulaciones y generar múltiples escenarios, haya parámetros que cambien, no solo de las propias actividades que ven modificada su duración, sino también del proyecto global. Como se modifican las duraciones del proyecto, los costes asociados a las mismas también se verán modificados, ya que el coste de una actividad depende de su duración. Por supuesto, en cada simulación, el valor de la duración total del proyecto será distinta, aunque si la cantidad de iteraciones realizada es suficientemente grande, ni el valor medio ni la varianza deberían de cambiar mucho, es decir, lo esperado es que tengan valores muy próximos. Esta variación también provoca cambios en la criticidad y crucialidad de las actividades (Acebes, et al., 2014), que se definen brevemente a continuación:

- Criticidad – Probabilidad en %, de que una actividad pertenezca al camino crítico.
- Crucialidad – Correlación entre la duración del proyecto y la duración de la actividad.

Con la obtención y evaluación de las variables de sensibilidad, se pretende medir y representar gráficamente estas variaciones.

2.3.2. Criticidad

La criticidad es la primera de las variables de sensibilidad que vamos a analizar utilizadas en el análisis de riesgos en la dirección de proyectos. El Índice de Criticidad (Martin, 1965) representa la probabilidad, dada en porcentaje o en tanto por uno, de que una actividad pertenezca al camino crítico. La explicación de la importancia de este parámetro es, como se ha expuesto anteriormente, que al suponer actividades de duración aleatoria, es posible que el camino crítico no sea siempre el mismo, debido a la incertidumbre que aporta la variabilidad de la duración de las actividades. Por tanto, con este parámetro, se consigue saber cuántas veces de todas las simuladas, cada actividad era parte del camino crítico.

Se considera que una actividad es crítica si no tiene margen para retrasarse, ya que, en caso de hacerlo, tendría un impacto directo sobre la duración total del proyecto, por lo que garantizar que estas actividades se ejecutan según el plazo planificado en el cronograma se convierte en una tarea clave. El conjunto de todas las actividades críticas, forma el camino crítico, que va desde el comienzo hasta el final del proyecto, y marca la duración total del mismo.

Conocer el valor del Índice de Criticidad (CI) de cada actividad, permite conocer qué actividades son críticas la mayor (o menor) parte de las ocasiones, y poder centrarse en prestarles especial atención ya que, en caso de sufrir algún retraso, impactará directamente en la fecha de finalización del proyecto en su conjunto (Acebes, et al., 2020).

Sin embargo, el Índice de Criticidad presenta algunas críticas, las más conocidas se presentan a continuación.

- Está basado en las estimaciones de duración de las actividades, y en caso de no ser precisas, el CI puede llevar a resultados inexactos.
- También se le critica por la falta de consideración de dependencias entre las actividades del proyecto. El CI se calcula de manera individual, sin tener en cuenta las dependencias o interrelaciones entre las actividades, lo que puede causar menor precisión a la hora de reflejar el impacto real de una actividad en el proyecto.
- Además, la métrica solo considera probabilidades, y el riesgo de una actividad proviene de la combinación probabilidad e impacto (Acebes, et al., 2014).

Como ejemplo, supongamos una actividad de corta duración, que siempre se encuentra en el camino crítico. El Índice de Criticidad de esta actividad es de 100%, y, sin embargo, el impacto que causaría en la duración total del proyecto es muy bajo, debido a su insignificante duración. A continuación, se describen el *Schedule Sensitivity Index* (SSI) y el Índice de Crucialidad, (CrI) que pretenden solucionar este problema (Ballestín & Leiva, 2017).

2.3.3. Schedule Sensitivity Index (SSI)

El SSI es la segunda variable de sensibilidad que vamos a analizar. Del inglés, *Schedule Sensitivity Index*, se le conoce como el Índice de Sensibilidad del Cronograma, y mide la sensibilidad de una actividad específica en relación con los cambios en el cronograma del proyecto.

El PMBOK menciona el análisis cuantitativo de riesgos como uno de los muchos métodos de evaluación de riesgos, y propone combinar la duración de la actividad y las desviaciones estándar de la duración del proyecto, con el Índice de Criticidad, y a eso se le conoce como el SSI (Project Management Institute, 2017), y se calcula como se muestra a continuación.

$$SSI = \left[\frac{\sqrt{\text{Var}(d_i)}}{\sqrt{\text{Var}(RD)}} \right] * CI \quad (1)$$

- Donde $\text{Var}(d_i)$, indica la varianza de ' d_i '.
- d_i indica la duración de la actividad ' i '.
- CI es el Índice de Criticidad
- RD es la duración real del proyecto

El objetivo principal del SSI es evaluar el impacto que los cambios en la duración de una actividad pueden tener en el proyecto, dando una medida cuantitativa que indica cómo una variación en una actividad específica puede influir en la duración total del proyecto.

Una medida elevada del SSI indica una mayor sensibilidad de las actividades al cronograma, lo que significa que cualquier cambio en su duración tendrá un impacto directo en la duración del proyecto. Por el contrario, un SSI bajo, indica que dichas actividades tienen mayor holgura y pueden absorber ciertos retrasos sin que tenga un impacto tan significativo en la duración del proyecto.

El cálculo de esta variable de sensibilidad, implica la realización de simulaciones con escenarios en los que se modifica las duraciones de ciertas actividades, y se evalúa el efecto de estos cambios según el impacto que tienen en el proyecto en conjunto. Esto se puede hacer con la ya mencionada simulación de Monte Carlo.

2.3.4. Crucialidad

Una de las posibles soluciones al problema que plantea el Índice de Criticidad, es el Índice de Crucialidad. El Índice de Crucialidad (CrI) (Williams, 1992), mide la correlación entre la duración de la actividad y la duración total del proyecto, es decir, esta medida refleja la importancia relativa de una actividad, de forma más intuitiva, y calcula la parte de la incertidumbre de la duración total del proyecto que puede explicarse por la incertidumbre de una actividad. Si la variabilidad de la duración de una actividad es grande, y la variabilidad de la duración del proyecto también lo es, entonces la actividad tiene un alto Índice de Crucialidad (Vanhoucke, 2013).

En el caso de que una actividad tenga un elevado Índice de Crucialidad, eso implica que es de gran importancia desde el punto de vista de la variabilidad, y que cualquier modificación en su duración se verá reflejada en la duración total del proyecto.

Sin embargo, también presenta algunas desventajas, puesto que en caso de que una actividad no tenga incertidumbre, su Índice de Crucialidad será 0, aunque pertenezca al camino crítico. Tal y como se ha expuesto anteriormente, cualquier retraso o modificación en la duración de una actividad crítica, repercute directamente sobre el proyecto, por lo que en ocasiones puede producir resultados poco coherentes con la realidad del proyecto.

Esta medida puede calcularse mediante: *Pearson's product-moment correlation*, *Spearman's Rank Correlation* y *Kendall's tau rank correlation* (Vanhoucke, 2012).

1. *Pearson's product-moment correlation* - CRI(r).

- El Índice de Crucialidad basado en el coeficiente de correlación producto-momento de Pearson, CRI(r) o CRI-P, es una medida de la correlación lineal entre dos variables (Vanhoucke, 2012).
- La correlación será igual a '1', en caso de ser una relación lineal positiva clara, e igual a '-1' en caso de relación lineal negativa. Si el valor es 0, eso indica la ausencia de correlación lineal. Se calcula mediante la siguiente ecuación.

$$\text{CRI}(r) = \frac{\sum_{k=1}^{nrs} (d_i^k - \bar{d}_l) * (RD^k - \overline{RD})}{nrs * \sigma_{d_i} \sigma_{RD}} \quad (2)$$

- A menudo, la relación entre la duración de una actividad y la duración total del proyecto sigue una relación no lineal. Por ello, (Cho & Yum, 1997), proponen usar medidas de correlación no lineales como el coeficiente de rangos de Spearman, o la medida de tau de Kendall, que se muestran a continuación (Vanhoucke, 2012).

2. *Spearman's Rank Correlation - CRI(ρ).*

- La correlación de rangos de Spearman, asume que los valores de las variables (duración de la actividad y duración del proyecto) se convierten en rangos, seguidos del cálculo de la diferencia entre los rangos de cada observación de las dos variables (Vanhoucke, 2012).
- Su valor se obtiene de sustituir las variables de la ecuación mostrada a continuación por sus valores en cada caso.

$$CRI(\rho) = 1 - \frac{6 * \sum_{k=1}^{nrs} \delta_k^2}{nrs * (nrs^2 - 1)} \quad (3)$$

Donde δ es la diferencia entre los valores de la duración de la actividad y el valor de la duración del proyecto durante cada iteración de la simulación.

3. *Kendall's tau rank correlation - CRI(τ).*

- Similar a CRI(ρ), el Índice de Crucialidad basado en el coeficiente de correlación de rangos de Kendall, convierte los valores de duración de la actividad y duración del proyecto en rangos, midiendo el grado de correspondencia entre dos clasificaciones (Vanhoucke, 2012).
- Al calcularlo con la siguiente ecuación, hace que tenga en cuenta las posibles no linealidades.

$$CRI(\tau) = \frac{4P}{nrs(nrs - 1)} - 1 \quad (4)$$

Donde 'P' se utiliza para representar el número de pares concordantes de las variables de duración de la actividad y duración del proyecto.

2.3.5. Cálculo e interpretación de las variables de sensibilidad

La interpretación de las variables de sensibilidad es clave durante las fases de seguimiento y control del proyecto. Tal y como se expone en los subapartados anteriores, estas variables proporcionan información valiosa sobre la relevancia e impacto de las actividades en el proyecto en su conjunto. La combinación de las mencionadas variables de sensibilidad proporciona una visión de las actividades críticas, y su posible impacto en el proyecto traducido en riesgos de retrasos y sobrecostes.

Se ha mencionado también las ventajas y críticas que tienen, y, en definitiva, se recomienda utilizar los indicadores Índice de Criticidad e Índice de Crucialidad, de forma conjunta, ya que ofrecen información complementaria para la toma de decisiones (Williams, 1993).

- Actividades con elevado Índice de Crucialidad deberán ser tratadas por la incertidumbre que crean sobre el proyecto.

- Actividades con elevado Índice Criticidad deberán ser acortadas, por el potencial impacto que tienen de convertirse en cuellos de botella y retrasar el proyecto en su conjunto.

La Ilustración 3 es una gráfica que representa los valores que toman los diferentes índices de sensibilidad estudiados, en un proyecto simulado formado por cinco actividades. Se puede apreciar cómo las actividades con Índice de Criticidad más elevado son la A1, A3, A4, con unos valores comprendidos entre el 40% y el 45%. Esto quiere decir, que el camino crítico pasará por estas actividades aproximadamente la mitad de las veces, motivo por el cual estas actividades son las de más riesgo para el proyecto. Al formar parte del camino crítico, y no tener holgura, cualquier retraso en la ejecución de estas actividades, no podría ser absorbido, causando directamente un retraso en la fecha de finalización del proyecto.

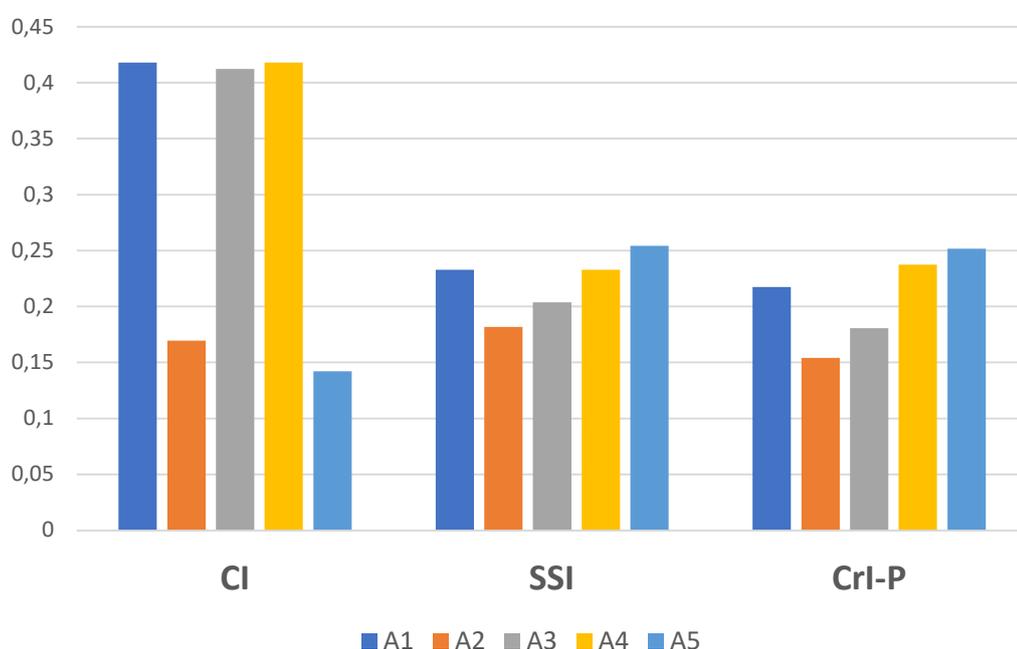


Ilustración 3. Gráfico de variables de sensibilidad. Fuente: Elaboración propia.

2.4 Ventajas y limitaciones

En este apartado se discutirán los beneficios que ofrece esta técnica, así como las posibles limitaciones o desafíos asociados a su aplicación.

2.4.1. Ventajas

La técnica SRA, y las variables de sensibilidad, presentan una serie de ventajas significativas en la gestión de proyectos, específicamente en la programación del mismo, debido a su capacidad de incorporar la incertidumbre asociada a las actividades. A diferencia de los métodos tradicionales, donde se consideran actividades de duración

determinista, la utilización de la SRA y las variables de sensibilidad permiten evaluar el cronograma con información más realista del comportamiento de las actividades.

- Mayor capacidad de identificación de actividades críticas y cruciales, y determinación de su influencia en el proyecto global.
 - La técnica SRA, permite identificar las actividades críticas para el cumplimiento de los plazos planificados para el proyecto, teniendo en cuenta la incertidumbre en la duración de las actividades.
 - Conocer el valor de las variables de sensibilidad, permite identificar aquellas actividades de mayor impacto en el proyecto.
- Mayor probabilidad de cumplir los plazos del proyecto.
 - Al proporcionar una visión más realista del cronograma, se pueden establecer plazos más alcanzables, lo que aumenta la probabilidad de cumplirlos.
- Mayor comprensión de la correlación entre actividades.
 - La técnica SRA y las variables de sensibilidad, proporcionan la importancia relativa de las actividades en función de su impacto en el cronograma del proyecto. Esto permite analizar la correlación entre las actividades del mismo, ya que ayuda a comprender mejor cómo los cambios que sufra una actividad del proyecto afectan a las demás.
 - Este punto es el objeto de la realización de este TFM, por lo que será desarrollado de manera más extensa en el Capítulo 3.

2.4.2. Limitaciones

- Disponibilidad de datos precisos.
 - En ocasiones, puede ser difícil obtener datos precisos, sobre todo en el caso de situaciones en las que escasean los datos históricos.
 - La falta de datos puede afectar a la confiabilidad de los resultados obtenidos de SRA, poniendo en entredicho la supuesta ayuda a la toma de decisiones.
- Complejidad del análisis.
 - Para obtener éxito con la realización de este análisis de riesgos, es necesario realizar una adecuada identificación de riesgos, asignación de probabilidad, estimación de impacto, de duraciones etc. que puede ser complejo.
 - Esta complejidad puede reducir la utilización de la técnica en proyectos con plazos ajustados o de recursos limitados.

- Incertidumbre inherente.
 - A pesar de que mediante la técnica SRA, se tiene en cuenta la incertidumbre de las actividades, y se consiguen resultados más realistas que los conseguidos con métodos tradicionales, la información no es fiable al 100%. Aunque se realicen muchas iteraciones en la simulación, y se contemplen multitud de escenarios, siempre existirá un margen de error ante la posibilidad de sucesos imprevisibles (cisnes negros) (Wideman, 2002).
- Dificultades en la interpretación de resultados y toma de decisiones.
 - Puede suponer un desafío interpretar correctamente las variables de sensibilidad mostradas, o adaptar la toma de decisiones a los resultados obtenidos, sobre todo en las ocasiones en las que nos e tenga experiencia.
 - La toma de decisiones utilizando estos indicadores puede requerir de un experto, lo que de nuevo puede afectar a la utilización de esta técnica en otros proyectos, debido a la falta de recursos o de personal experimentado.

2.4.3. Estrategias para mitigar las limitaciones

- Mejora de la recopilación de datos.
 - Asegurarse de obtener información actualizada sobre las duraciones de las actividades del proyecto, las relaciones de dependencias entre ellas, y las probabilidades de ocurrencia de los riesgos identificados. Se pueden usar entrevistas, estimaciones de expertos, o análisis histórico.
- Utilización de software especializado.
 - Existen herramientas y software de simulación de Monte Carlo, que pueden ayudar al cálculo e interpretación de las variables de sensibilidad, así como a visualizar los resultados obtenidos. A modo de ejemplo, en la realización de este TFM se ha utilizado el @Risk (Palisade, s.f.).
- Actualización y revisión periódica del análisis de riesgos.
 - Según avance la ejecución del proyecto es importante actualizar el plan de análisis de riesgos, ya que los proyectos son dinámicos. Esto implica reanalizar y ajustar las duraciones de las actividades, relaciones de precedencia, restricciones, probabilidades de ocurrencia de riesgos o impacto de los mismos. Por lo tanto, se verán modificados los indicadores de sensibilidad calculados al inicio del proyecto para cada actividad.
 - Hacerlo permitirá una mejor adaptación a los cambios y una toma de decisiones más efectiva basada en información actualizada.

- Incorporar expertos y especialistas a la toma de decisiones.
 - o Contar con especialistas en el análisis de riesgos, que estén familiarizados con la interpretación de variables de sensibilidad, y que ayuden a evaluar y gestionar los riesgos de forma más efectiva.

Con estas estrategias consideradas, es posible aprovechar al máximo las ventajas que supone utilizar la técnica SRA y las variables de sensibilidad, superando las limitaciones para realizar una gestión de riesgos eficaz y mejorar la toma de decisiones en la planificación de proyectos, gestionando la incertidumbre asociada a la duración de las actividades de un proyecto.

Capítulo 3 CORRELACIÓN

La gestión de proyectos implica planificar y controlar el cronograma para lograr los objetivos del proyecto. En este contexto, la gestión de las interrelaciones entre actividades juega un papel crítico en la ejecución del proyecto.

Las actividades que forman parte de un proyecto no suelen ser ‘islas’ que suceden de forma aislada, sino que están interconectadas entre sí. Es lo que se define como la correlación entre actividades. La forma en que dichas actividades se influyen mutuamente puede tener un impacto significativo en la duración total del proyecto, y la investigación al respecto es el objetivo del presente capítulo.

En primer lugar, en este capítulo, nos centraremos en estudiar la correlación entre actividades, y su posible influencia en el cronograma del proyecto. Veremos también los tipos de correlación conocidos, así como los métodos de análisis de la correlación, y analizaremos el impacto en la duración del proyecto. Se expondrán los métodos de análisis de la correlación, y por último, se introducirá el impacto que puede tener la correlación entre actividades en la duración del proyecto.

3.1 Correlaciones entre actividades

La correlación entre actividades de un proyecto hace referencia a las relaciones de dependencia que puedan existir entre ellas, es decir, la influencia que el inicio o finalización de una actividad puede tener en el inicio o finalización de otras (Triola, 2009). Dado el caso de dos actividades fuertemente correlacionadas, los cambios o modificaciones que una actividad sufra, se verán reflejados directamente en la otra, pudiendo ocasionar modificaciones a nivel general en el proyecto, y alterando la fecha de finalización del mismo (Formación, 2022).

Conocer la existencia de correlaciones entre las actividades de un proyecto, es clave para una eficaz gestión del mismo, ya que permite identificar las dependencias críticas y potenciales áreas de riesgo. Con esa información, se pueden tomar mejores decisiones sobre la asignación de recursos, o desarrollo de estrategias para intentar reducir el impacto que puede tener dicha correlación sobre la duración del proyecto. La alteración de la duración de una actividad correlacionada con otra del cronograma, sobre todo en los casos en los que las correlaciones existan entre actividades que forman parte del camino crítico, o que al menos una de ellas lo hace, puede tener un impacto significativo en el cronograma, alargándolo.

Tras un análisis preliminar, a continuación se citan algunas de las correlaciones entre actividades que pueden afectar al proyecto:

- Relaciones de precedencia → Actividades cuyo comienzo o finalización, depende del inicio o finalización de otras actividades.
- Recursos → Actividades que comparten recursos como por ejemplo personal, maquinaria o materiales. El hecho de que una actividad sufra un retraso puede afectar a la disponibilidad de los recursos para otras actividades relacionadas.
- Cambios de alcance → Cuando el cliente solicita cambios en el diseño o modificaciones en los requisitos, es posible que afecten a diversas actividades.
- Efecto aprendizaje → El conocimiento y experiencia en la realización de una actividad puede beneficiar a otras actividades relacionadas. Por ejemplo, un buen trabajo en las fases de diseño facilita la fase de fabricación.

3.2 Tipos de correlación

Existen distintos tipos de correlación entre actividades, pero, en primer lugar, vamos a detallar cómo pueden ser las correlaciones en cuanto a la intensidad de las mismas. En esta clasificación se puede distinguir entre correlación fuerte y correlación débil, en función de la influencia que tenga la modificación sufrida en una actividad, sobre otra con la que este correlacionada (Formación, 2022).

Por un lado, correlación fuerte hace referencia a que los cambios en una de las variables están relacionados y predicen cambios similares en otra variable. Este tipo de correlación se representa mediante un coeficiente comprendido entre '+1' y '-1', donde '+1' indica una correlación fuerte positiva, y el '-1' indica una correlación fuerte negativa.

Por otro lado, la correlación débil se da cuando los cambios producidos en una variable apenas son indicadores de los cambios sobre la otra, es decir, tienen influencia limitada.

Clasificar la correlación entre actividades en fuerte y débil, es solamente uno de los atributos que puede tener la correlación. A continuación, se exponen otras clasificaciones o tipos de correlación, compatibles con la clasificación fuerte-débil. Véase, en el caso de contar con dos actividades, 'A' y 'B', se dice que la correlación de una actividad 'A', sobre la actividad sucesora 'B', puede ser fuerte o débil, independientemente de la forma o el tipo de correlación que exista entre las actividades, es decir, el hecho de que sea una relación fuerte o no, no limita para que pertenezca a un tipo u otro de correlación, de las que se van a ver y detallar en los siguientes apartados.

A continuación, se detallan las tres formas principales de correlación, y posteriormente, se verán los tipos de correlaciones más importantes.

3.2.1. Formas de correlación

1. Positiva.

Se dice que existe correlación positiva entre actividades, por ejemplo, entre ‘A’, y ‘B’, cuando un aumento en la duración de ‘A’, se traduce en un aumento en la duración de la otra actividad correlacionada, ‘B’, es decir, hay una relación directa entre ambas actividades, y una modificación en cualquiera de ellas, tiene un impacto en la otra, modificándola en la misma dirección (Superprof, 2022).

Por un lado, un retraso sufrido por una actividad correlacionada positivamente con otra daría lugar a un efecto en cadena, alargando también la duración de las actividades sucesoras, y teniendo un impacto negativo en el proyecto. Es importante gestionar estas correlaciones positivas para evitar que se acumulen los retrasos, impactando a todo el proyecto. El caso en que una actividad que esta correlacionada positivamente con otra, sufre un retraso, y éste impacta a todo el proyecto, es visible en la Ilustración 4.

Por otro lado, en la ejecución de los proyectos, rara vez se da el caso de actividades que finalizan antes de lo previsto (Hortigüela Arozamena, 2022), debido al Síndrome del estudiante (el cual dice que durante los primeros “2/3” del tiempo destinado a la ejecución de una actividad, se realiza “1/3” de trabajo, y durante el último “1/3” del tiempo, se realizan los “2/3 del trabajo restante), o a la Ley de Parkinson (la cual afirma que la realización del trabajo se extenderá hasta cubrir todo el tiempo designado en la planificación, aunque la intensidad del trabajo sea baja, por lo que no se reportan actividades finalizadas antes de la fecha planificada). Sin embargo, en la situación en que una actividad se adelanta a su fecha planificada de finalización, y se encuentre correlacionada positivamente con otra, tendría un efecto beneficioso para el proyecto, disminuyendo la duración del mismo, en caso de poder aprovecharse dicho adelanto.

Un ejemplo de donde se dan este tipo de correlaciones es entre las actividades del camino crítico. En la Ilustración 4 se puede apreciar un ejemplo de dos actividades ‘A’, y ‘B’, que pertenecer al camino crítico y con correlación positiva entre ellas, ya que al aumentar la duración de la actividad ‘A’, también lo hace la de ‘B’.

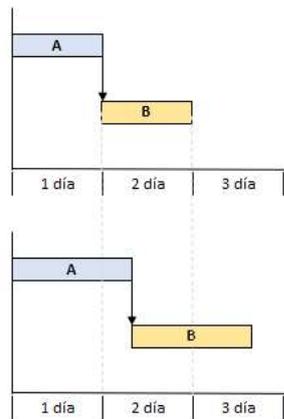


Ilustración 4. Correlación positiva. Fuente: Elaboración propia.

2. Negativa.

Este tipo de correlación entre dos actividades ocurre cuando el aumento en la duración de ‘A’, conlleva una disminución en la duración de ‘B’, por tanto, la relación entre las actividades es inversa (Superprof, 2022).

La correlación negativa entre actividades del cronograma puede ser beneficioso para la gestión del proyecto, ya que un retraso en una actividad sería compensado por un adelanto en su actividad correlacionada. De igual manera, un adelanto en una actividad correlada negativamente con otra, implicaría un retraso en la ejecución de la siguiente. Es fundamental identificar este tipo de correlaciones, para evitar una asignación de recursos innecesaria, tal y como se ha visto en este último caso (gráficamente representado en Ilustración 5), destinar mayor cantidad de recursos a la ejecución de una actividad provocando que se adelante su fecha de finalización, puede provocar el efecto contrario en el proyecto global, en el caso de que esté correlacionada negativamente con alguna actividad sucesora.

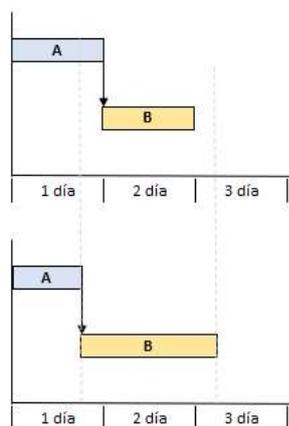


Ilustración 5. Correlación negativa. Fuente: Elaboración propia.

3. Nula.

Cuando no hay dependencia entre las variables, se dice que la correlación entre ellas es nula. Esto significa que las modificaciones que sufra una actividad en su duración no tienen un efecto directo en la duración de otras actividades, por tanto, los retrasos no se propagan a las sucesoras (Ilustración 6).

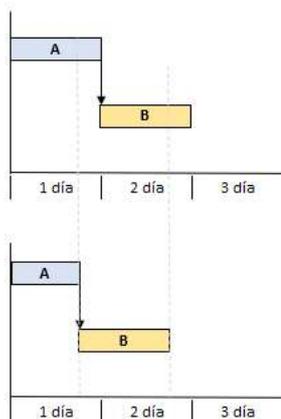


Ilustración 6. Correlación nula. Fuente: Elaboración propia.

3.2.2. Tipos de correlación

Además de las mencionadas formas de clasificar correlaciones, según su impacto en fuerte-débil, o según su influencia en las demás, positiva-negativa-nula, también se pueden clasificar según su comportamiento, en correlación lineal y correlación no lineal.

Independientemente de la naturaleza de la correlación, es preciso identificarla ya que puede tener implicaciones relevantes en la planificación y ejecución del proyecto. Realizar una correcta identificación permitirá una evaluación más precisa y significativa de los posibles impactos que pueden tener para el proyecto.

1. Correlación lineal.

La correlación lineal entre dos actividades implica una relación directa entre ellas. Es decir, en caso de tener dos actividades 'A' y 'B' correlacionadas linealmente, si un aumento en la duración de una de las dos produce un aumento en la otra actividad relacionada, en este caso estaríamos delante de dos actividades con correlación lineal positiva. De igual manera, si un aumento en la duración de unas actividades produce una disminución proporcional en la duración de la otra actividad relacionada, estaríamos ante una correlación lineal negativa (Triola, 2009).

En la Ilustración 7, se muestra un ejemplo de dos actividades con correlación lineal positiva. La actividad 'A' representa el diseño de la interfaz de usuario en un proyecto de desarrollo de software, y la actividad 'B' representa la codificación del sistema. Si se pasa más tiempo diseñando y detallando la interfaz de usuario, más trabajo se tendrá que realizar en su codificación, alargando su duración.

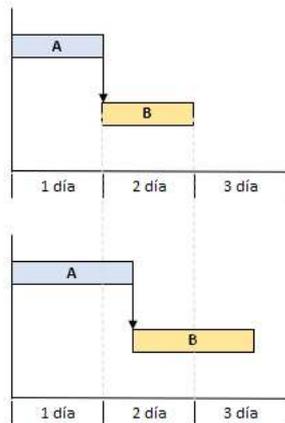


Ilustración 7. Correlación lineal y positiva. Fuente: Elaboración propia.

2. Correlación no lineal.

Este tipo de correlación implica una relación más compleja y no sigue una forma lineal. La relación puede venir definida por patrones, o tendencias. En el contexto de la gestión de proyectos, la correlación no lineal se da en actividades que sufren modificaciones y que no se traducen directamente en cambios permanentes en sus sucesoras (Triola, 2009).

En la Ilustración 8 se muestra un ejemplo de dos actividades con correlación no lineal positiva. La actividad 'A' representa la publicidad, y la actividad 'B' representa las ventas. Al aumentar el gasto y el tiempo dedicado a hacer publicidad del producto, hace que aumenten las ventas de manera proporcional. Ese caso concordaría con una fase inicial del proceso de marketing, que es la mostrada en la Ilustración 8. Sin embargo, a medida que pasa el tiempo y el mercado se satura de publicidad del producto, el incremento de las ventas será menor (Ilustración 9). Con este ejemplo se pretende demostrar una situación de correlación entre actividades no lineal, es decir, que no sigue un patrón proporcional.

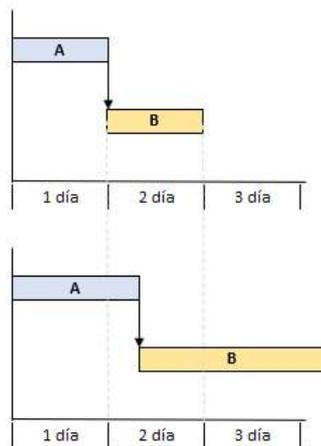


Ilustración 8. Correlación no lineal y positiva.
Fuente: Elaboración propia.

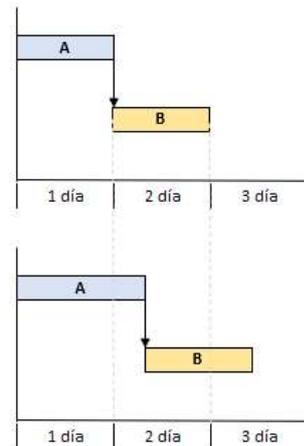


Ilustración 9. Correlación no lineal y positiva.
Fuente: Elaboración propia.

3.3 Métodos de análisis de la correlación

En este apartado se investigarán los métodos y técnicas utilizadas para llevar a cabo el análisis de correlación entre actividades.

En el 2.3.4 Crucialidad, se han presentado y definido los índices de correlación, como el *Pearson's product-moment correlation*, *Spearman's Rank Correlation* y *Kendall's tau rank correlation*. Estos índices son herramientas estadísticas ampliamente utilizadas para cuantificar la relación entre las actividades de un proyecto (Triola, 2009). A continuación, se mostrará cómo utilizar estos índices para analizar la correlación entre las actividades y comprender su impacto en el proyecto.

El análisis de la correlación es esencial para identificar las dependencias críticas entre actividades del proyecto. Utilizando los mencionados índices de correlación, podemos cuantificar la dirección y fuerza de la correlación entre actividades (3.2.1 Formas de correlación).

El coeficiente de correlación de *Pearson* es útil cuando las actividades se distribuyen de manera lineal. Por otro lado, el coeficiente de correlación de *Spearman* y el coeficiente de correlación de *Kendall*, son adecuados para identificar correlaciones no lineales (Minitab, 2015).

3.4 Impacto en la duración del proyecto

Cuando existe correlación entre actividades de un proyecto, las modificaciones que sufra una de ellas, se propagan hacia las otras actividades correlacionadas. Esto significa que, si una actividad se retrasa o se adelanta, puede afectar al inicio o finalización de las actividades sucesoras interrelacionadas con dicha actividad, dependiendo del tipo de correlación que exista entre ellas.

El impacto que pueden tener estas correlaciones en el cronograma del proyecto puede ser significativo, por lo que es importante cuantificarlo. La mala gestión de las correlaciones entre actividades puede llevar a una reacción en cadena, ocasionando desviaciones en los plazos, retrasos en la fecha de finalización del proyecto, y, por tanto, el incumplimiento de los objetivos establecidos.

La existencia de correlación fuerte entre dos actividades que pertenecen al camino crítico implica que un retraso en la primera, provoque que se retrase el inicio y por tanto finalización de la siguiente actividad. Por el hecho de pertenecer al camino crítico, estas actividades no tienen holgura, es decir, no tienen capacidad de absorber retrasos. Por tanto, un retraso en una actividad del camino crítico, con correlación fuerte con otra actividad sucesora perteneciente al camino crítico, tendría un impacto directo en la fecha de finalización del proyecto, alargándola.

3.5 Trabajos donde estudian correlación en situaciones reales

En el estado del arte sobre la correlación entre actividades del proyecto, se han encontrado algunos trabajos, y se muestran a continuación. Sin embargo, la mayoría de los trabajos encontrados poseen un enfoque centrado en relaciones de causalidad entre actividades, en lugar de en las correlaciones entre sí. La literatura que aborda específicamente la correlación entre actividades es escasa, lo que destaca la necesidad de investigar más en este campo.

Dentro de los trabajos identificados, el primero, (Dvir et al., 2003), se enfoca en analizar la correlación entre la planificación del proyecto y el éxito del mismo. Los resultados de esta investigación concluyen que existe una relación positiva entre el esfuerzo invertido en definir las metas y requisitos del proyecto, y el logro exitoso de los objetivos planteados por el cliente.

En la misma línea, en Pinto (2015) se investiga por un lado la correlación entre la comunicación dentro del equipo y la satisfacción del cliente, y en Hillson & Murray-Webster (2017) se estudia la correlación entre la gestión de riesgos y el éxito del proyecto.

Sin embargo ninguno de estos trabajos mencionados investiga la correlación entre las actividades de un proyecto. Solamente se han encontrado las investigaciones de Yang (2007), Wang & Demsetz (2000) y por último Pajares et al. (2022). Dichas investigaciones concluyen que la correlación entre actividades apenas tiene impacto en la duración media del proyecto.

Capítulo 4 MÉTODO DE ESTUDIO

En el presente capítulo, plantearemos un caso de estudio con el objetivo de analizar la relación entre los indicadores de sensibilidad y la correlación entre actividades en un proyecto. Para ello en la primera parte se presenta la introducción al método de estudio, con el objetivo de comprender los motivos que propiciaron esta investigación.

Posteriormente, se introduce la relación entre los indicadores de sensibilidad y la correlación entre actividades, buscando comprender cómo estas variables pueden influir en la duración media o confianza sobre la fecha de finalización del proyecto.

A continuación, se describe la red del proyecto utilizada, detallando las actividades involucradas y los distintos casos planteados variando las funciones de distribución que modelan la duración de las actividades y la correlación entre las mismas.

Finalmente, se presenta la definición del estudio, que proporciona una guía para el análisis y la interpretación de los resultados obtenidos.

4.1 Introducción

Los trabajos de investigación en el ámbito de la planificación de proyectos, no han prestado suficiente atención a la correlación entre las actividades del proyecto. CPM, PERT, y la gran parte de los métodos de programación, asumen que las duraciones de las actividades son independientes (Wang & Demsetz, 2000). Sin embargo, al afrontar proyectos reales, es frecuente encontrar actividades cuya duración está significativamente correlacionada con otras actividades, debido a diversos factores como relaciones de precedencia, disponibilidad de recursos, efecto aprendizaje, o cambios en el alcance.

Repasando la escasa investigación realizada en este ámbito, Van Dorp & Duffey (1999), advirtieron del impacto que puede tener la existencia de correlaciones entre actividades, en la gestión de proyectos de gran envergadura. Por otro lado, trabajos como Wang & Demsetz (2000) y Yang (2007), concluyen que la duración del proyecto apenas se ve afectada por la existencia de correlaciones entre actividades del proyecto.

En Pajares et al. (2022) se muestra un ejemplo que ilustra la importancia de las interrelaciones y correlaciones entre las duraciones de las actividades. Propone que las correlaciones pueden tener un impacto en los indicadores de sensibilidad, como por ejemplo la criticidad y la crucialidad. Por lo tanto, resulta fundamental tomar en cuenta estas correlaciones al programar y monitorizar un proyecto, ajustando el enfoque de control en función de la duración de las actividades críticas y la variabilidad en las actividades cruciales.

En este trabajo, con el objetivo de analizar el impacto de la correlación entre actividades en la duración del proyecto, se van a estudiar de forma conjunta los indicadores de sensibilidad, los valores de correlación, y los estadísticos de las actividades, usando para ello simulación de Monte Carlo.

Los indicadores de sensibilidad que se van a considerar son aquellos que han demostrado proporcionar buenos resultados a la hora de tomar decisiones basadas en ellos Vanhoucke (2012), Ballesteros-Pérez et al. (2019) o Acebes et al. (2020), mostrados a continuación:

- Criticidad (CI): probabilidad de que una actividad forme parte del camino crítico.
- Crucialidad (CrI): correlación entre la duración de una actividad y la duración total del proyecto.
- *Schedule Sensitivity Index* (SSI): indicador que trata de corregir los problemas que presenta la criticidad, proponiendo incluir en el cálculo las desviaciones típicas de la actividad y del proyecto.

4.2 Relación entre los indicadores de sensibilidad y correlación

Por un lado, los indicadores de sensibilidad mencionados (CI, CrI y SSI), proporcionan información sobre la importancia de las actividades del proyecto, en cuanto al impacto que pueden tener en la duración del proyecto. En entornos con incertidumbre, estos indicadores ayudan a identificar las actividades con mayor importancia relativa, en términos de su potencial impacto en la duración total del proyecto. Estos indicadores aportan información sobre cómo los cambios en una actividad pueden afectar a la duración global.

Por otro lado, está la correlación entre actividades del proyecto, que indica la dependencia entre ellas. En caso de existir una correlación positiva, las duraciones de las actividades involucradas tienden a moverse en la misma dirección (es decir, si una se atrasa, la o las actividades correlacionadas también lo harán). Por otro lado, una correlación negativa indica que las duraciones de las actividades involucradas se comportan de manera opuesta (si una actividad se retrasa, es probable que las actividades relacionadas se adelanten).

La relación entre ambos conceptos, radica en cómo las variaciones en las duraciones de las actividades afectan a la duración total del proyecto. Cuando hay una correlación significativa entre las actividades, las variaciones en las duraciones de una actividad se propagan y afectan a las actividades correlacionadas, lo cual puede tener también un impacto en los indicadores de sensibilidad, ya que las actividades críticas pueden variar en función de la influencia de la correlación entre actividades en su duración.

4.3 Definición de la red de proyecto

En este apartado se define la red del proyecto cuyas actividades van a ser objeto de estudio. La red de proyecto cuenta con cinco actividades (A1-A2-A3-A4-A5), además, de la A0 o actividad inicial, y la Af o actividad final. En la Tabla 1, se pueden apreciar las actividades y sus relaciones de precedencia.

Tabla 1. Actividades y relación de precedencia. Fuente: Elaboración propia.

Actividad	Precedente
A1	-
A2	-
A3	A1
A4	A1
A5	A2, A3

Según la planificación del proyecto, en primer lugar, se realizan las actividades A1 y A2. La finalización de la actividad A1, permite el comienzo de las actividades A3 y A4. Posteriormente, una vez que A2 haya finalizado, y contando con que A3 también haya finalizado, comienza la actividad A5. En el grafo mostrado a continuación en la Ilustración 10 se aprecian dichas relaciones de precedencia.

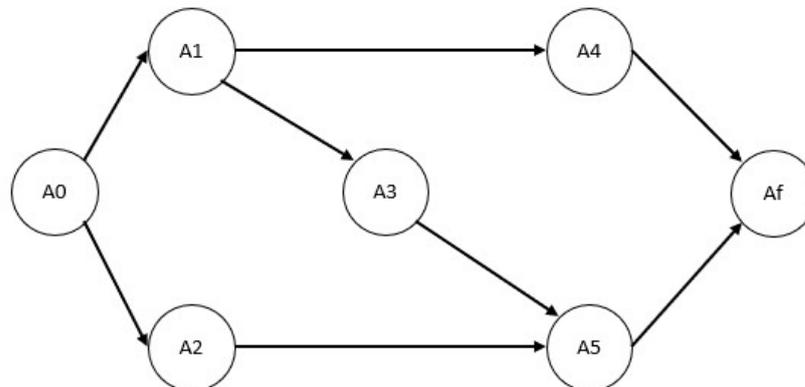


Ilustración 10. Diagrama AON del proyecto. Fuente: Elaboración propia.

Las actividades consideradas, tienen una duración sujeta a incertidumbre, con la intención de simular actividades reales de proyectos reales, y son definidas por varios parámetros. Para este ejemplo, se han considerado dos escenarios.

La red de proyecto para ambos escenarios es la mostrada en Ilustración 10. Se puede apreciar que hay tres caminos críticos posibles, y en ausencia de incertidumbre se ha considerado la existencia de dos situaciones diferentes. En la primera de ellas hay un

camino predominante, el formado por las actividades A1-A4, mientras que los otros dos caminos son de la misma duración. Por otro lado, en el segundo escenario se ha considerado que los tres caminos posibles son de la misma duración, en ausencia de incertidumbre. Además, en cada escenario se modela la duración de las actividades mediante funciones de distribución distintas. En el primer caso se considera que siguen una función de distribución normal, y en el segundo, que siguen una función de distribución triangular. Las diferencias entre los escenarios pueden observarse en la Tabla 2.

Tabla 2. Resumen de escenarios.

Escenarios	Función de distribución de probabilidad	Casos	Actividades	Tipo de correlación
Escenario 1 Camino crítico dominante	Normal	Caso 1	-	-
		Caso 2	A1-A2	Fuerte ($\pm 0,8$)
		Caso 3	A1-A3	Fuerte ($\pm 0,8$)
		Caso 4	A1-A4	Fuerte ($\pm 0,8$)
	Triangular	Caso 1	-	-
		Caso 2	A1-A2	Fuerte ($\pm 0,8$)
		Caso 3	A1-A3	Fuerte ($\pm 0,8$)
		Caso 4	A1-A4	Fuerte ($\pm 0,8$)
Escenario 2 Caminos similares	Normal	Caso 1	-	-
		Caso 2	A1-A2	Fuerte ($\pm 0,8$)
		Caso 3	A1-A3	Fuerte ($\pm 0,8$)
		Caso 4	A1-A4	Fuerte ($\pm 0,8$)
	Triangular	Caso 1	-	-
		Caso 2	A1-A2	Fuerte ($\pm 0,8$)
		Caso 3	A1-A3	Fuerte ($\pm 0,8$)
		Caso 4	A1-A4	Fuerte ($\pm 0,8$)

En el primer escenario, donde existe un camino crítico predominante, contamos con el camino formado por las actividades A1-A4, de mayor duración que los otros dos caminos posibles.

En el primer caso, la duración de las actividades se ajusta a una función de distribución normal (Tabla 3). Esta distribución se describe por dos parámetros, la media (μ) y la

desviación estándar (σ). La media representa el valor central de la distribución, y la desviación estándar indica la dispersión de los datos alrededor de la media.

Tabla 3. Escenario 1. Caso 1. Duración de actividades según distribución normal.

Actividad	Precedente	Función de distribución de probabilidad		μ	σ
		Función de distribución de probabilidad	Parámetros		
A1	-	Normal	μ, σ	5,5	1
A2	-	Normal	μ, σ	13	1
A3	A	Normal	μ, σ	7,5	1
A4	A	Normal	μ, σ	19	1
A5	B, C	Normal	μ, σ	9,5	1

Conforme con la red del proyecto, y con las duraciones de las actividades, la duración de cada uno de los caminos, en condiciones sin incertidumbre, es la mostrada en la Tabla 4. Se puede observar la existencia de un camino más largo que el resto, el formado por las actividades A1-A4, es decir, dichas actividades serán las de mayor índice de criticidad cuando se tenga en cuenta la incertidumbre al realizar la simulación.

Tabla 4. Camino dominante. Función de distribución normal.

Caminos	Actividades	Duración
Camino 1	A1-A4	24,5
Camino 2	A1-A3-A5	22,5
Camino 3	A2-A5	22,5

En el segundo caso (Tabla 5), se busca que la función de distribución de las actividades no sea simétrica, por ello la duración de las actividades se ajusta a una función de distribución triangular. Esta distribución considera valor mínimo (optimista), máximo (pesimista) y más probable, lo que permite obtener diferentes grados de incertidumbre y por tanto mayor variabilidad en la estimación de la duración de las actividades.

Tabla 5. Escenario 1. Caso 2. Duración de actividades según distribución triangular.

Actividad	Precedente	Función de distribución de probabilidad	Optimista	Más probable	Pesimista
A1	-	Triangular	4	4,5	8
A2	-	Triangular	11	11,5	16,5
A3	A	Triangular	6,5	7	9
A4	A	Triangular	17	18	22
A5	B, C	Triangular	8,5	9	11

La duración determinista de los posibles caminos de la red de proyecto, considerando actividades cuya duración se ha modelado mediante funciones de distribución triangular, se puede observar en la Tabla 6.

Tabla 6. Camino dominante. Función de distribución triangular.

Caminos	Actividades	Duración
Camino 1	A1-A4	22,5
Camino 2	A1-A3-A5	20,5
Camino 3	A2-A5	20,5

A pesar de que las duraciones de los caminos críticos en los distintos casos (modeladas con funciones de distribución normal, y triangular), sean distintas, las duraciones medias han sido calculadas haciéndolas equivalentes. Por ello, partiendo de la información de las duraciones de las actividades mostradas en la Tabla 3, y utilizando la ecuación (5), se obtienen los valores de las duraciones mínima (a), más probable (b) y máxima (c), que son los parámetros que van a definir el espectro de duraciones posibles de cada actividad modelada mediante distribuciones triangulares.

$$\mu = \frac{a + b + c}{3} \quad (5)$$

En el segundo escenario, se considera que los tres caminos posibles son de la misma duración media, sin contemplar incertidumbre. Al establecer una referencia equitativa en ausencia de incertidumbre, se facilita la comparación y el análisis del impacto de la incertidumbre y la correlación en los diferentes caminos críticos y por tanto en la duración del proyecto.

En el primer caso, la duración de las actividades se ajusta a una función de distribución normal (Tabla 7).

Tabla 7. Escenario 2. Caso 1. Duración de actividades según distribución normal.

Actividad	Precedente	Función de distribución de probabilidad	Parámetros	μ	σ
A1	-	Normal	μ, σ	5,5	1
A2	-	Normal	μ, σ	13	1
A3	A	Normal	μ, σ	7,5	1
A4	A	Normal	μ, σ	17	1
A5	B, C	Normal	μ, σ	9,5	1

Conforme con la red del proyecto, y con las duraciones de las actividades, la duración de cada uno de los caminos, en condiciones sin incertidumbre, es la mostrada en la Tabla 8. Todos los caminos posibles tienen la misma duración determinista, de 22,5 unidades de tiempo.

Tabla 8. Caminos iguales. Función de distribución normal.

Camino	Actividades	Duración
Camino 1	A1-A4	22,5
Camino 2	A1-A3-A5	22,5
Camino 3	A2-A5	22,5

En el segundo caso (Tabla 9), se busca que la función de distribución de las actividades no sea simétrica, por ello la duración de las actividades se ajusta a una función de distribución triangular. Esta distribución considera valor mínimo (optimista), máximo (pesimista) y más probable, lo que permite obtener diferentes grados de incertidumbre y por tanto mayor variabilidad en la estimación de la duración de las actividades.

Tabla 9. Escenario 2. Caso 2. Duración de actividades según distribución triangular.

Actividad	Precedente	Función de distribución de probabilidad	Optimista	Más probable	Pesimista
A1	-	Triangular	4	4,5	8
A2	-	Triangular	11	11,5	16,5
A3	A	Triangular	6,5	7	9
A4	A	Triangular	15,5	16	19,5
A5	B, C	Triangular	8,5	9	11

La duración determinista de los posibles caminos de la red de proyecto, considerando actividades cuya duración se ha modelado mediante funciones de distribución triangular, se puede observar en la Tabla 10.

Tabla 10. Caminos iguales. Función de distribución triangular.

Caminos	Actividades	Duración
Camino 1	A1-A4	20,5
Camino 2	A1-A3-A5	20,5
Camino 3	A2-A5	20,5

En este segundo escenario, en caso de modelar la duración de las actividades mediante funciones de distribución normal, también se han realizado los cálculos correspondientes para que sea una duración media equivalente a la obtenida modelando la duración de las actividades mediante funciones de distribución triangular. Partiendo de la información de las duraciones de las actividades mostradas en la Tabla 7, y utilizando la (5), se obtienen los valores de las duraciones mínima (a), más probable (b) y máxima (c), que son los parámetros que van a definir el espectro de duraciones posibles de cada actividad modelada mediante distribuciones triangulares.

4.4 Definición del estudio

El escenario en el que se desarrolla este proyecto, y aplicando la técnica SRA, consideramos la incertidumbre en la duración de las actividades (Ahmed & Issa, 2006). El considerar actividades con incertidumbre, implica que el camino crítico no es fijo, y puede variar debido a los posibles escenarios y resultados de las estimaciones de la duración de las actividades. Para recoger dicha variabilidad, se utiliza simulación de Monte Carlo, y se ejecutan múltiples simulaciones. A partir de los resultados de dichas simulaciones, se calculan las variables de sensibilidad como la criticidad, la crucialidad, o el SSI.

En lugar de existir un camino crítico único, se puede decir que existe un camino crítico probabilístico, el cual representa la secuencia de actividades que durante la mayor parte de las iteraciones han sido parte del camino crítico. Para conocer el camino crítico, se utilizan los valores de la criticidad, éste estará formado por las actividades con mayor Índice de Criticidad, es decir, aquellas actividades que hayan pertenecido al camino crítico en mayor cantidad de ocasiones de las iteraciones simuladas.

En la Ilustración 11, se muestran los resultados de una de las simulaciones realizadas, a modo de ejemplo, para mostrar cómo se obtiene el camino crítico en el contexto de utilizar simulación de Monte Carlo contemplando incertidumbre. En la Ilustración 11, se puede apreciar el grafo del proyecto, con una duración de 23,94 unidades de tiempo.

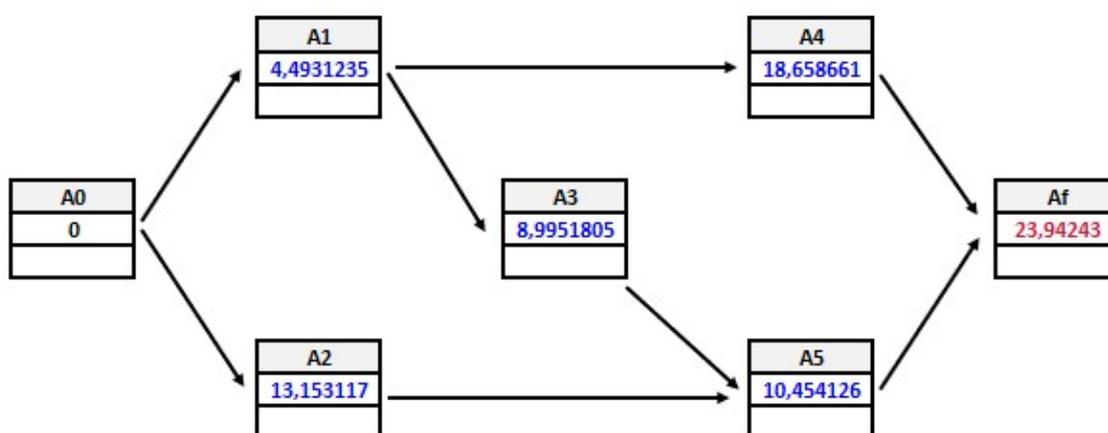


Ilustración 11. Ejemplo de simulación de Monte Carlo. Fuente: @Risk (Elaboración propia).

En este ejemplo, el camino crítico correspondería con el camino número 2, formado por las actividades A1, A3 y A5 (Tabla 11). Sumando la duración estimada de ambas actividades ($A1 = 4,4931235$, $A3 = 8,9951805$ y $A5 = 10,454126$), obtenemos la duración del proyecto, de 23,94243.

Tabla 11. Camino crítico, ejemplo de simulación. Fuente: @Risk (Elaboración propia).

Caminos	Actividades	Duración
Camino 1	A1-A4	23,1517843
Camino 2	A1-A3-A5	23,9424301
Camino 3	A2-A5	23,6072435

En esta iteración el camino crítico pasa por las actividades A1, A3 y A5, y se puede apreciar en la Tabla 12, que la actividad con mayor Índice de Criticidad es la actividad A1, con un valor de 0,786. Es decir, el 78,6% de las simulaciones, el camino crítico contenía a esta actividad. La segunda actividad más crítica es la A5, y la actividad que forma parte del camino crítico la menor parte de las simulaciones, es la A2, con una aparición en el camino crítico del proyecto del 21,4% de las simulaciones.

Tabla 12. Ejemplo de medición de variables de sensibilidad. Fuente: @Risk (Elaboración propia).

Actividad	CI	SSI	CrI
A1	0,786	0,623	0,659
A2	0,214	0,150	0,110
A3	0,397	0,265	0,267
A4	0,390	0,201	0,207
A5	0,610	0,463	0,479

El software usado para aplicar la simulación de Monte Carlo al proyecto, es @Risk de Palisade (Palisade, s.f.). Dicho programa permite generar números aleatorios, siguiendo la función de distribución de probabilidad estipulada para cada uno de los dos escenarios, empleada para obtener las duraciones de las actividades del proyecto (variables de entrada).

Además, se introducen valores de correlación entre distintos pares de actividades, y se realizan las simulaciones de 5.000 iteraciones, para ver qué impacto tienen estas correlaciones sobre las variables de sensibilidad, y la duración del proyecto (variable de salida). En concreto, se han desarrollado las simulaciones con parámetros de correlación fuerte (0,8), variando las actividades correlacionadas en cada caso.

Capítulo 5 RESULTADOS Y ANÁLISIS

En este capítulo, se presentan los resultados y análisis obtenidos tras realizar simulación de Monte Carlo, con el software @Risk, de la red de proyecto definida anteriormente en 4.3 Definición de la red de proyecto. Se ha modelado la incertidumbre de la duración de las actividades mediante dos funciones de distribución distintas, dando lugar a dos escenarios, buscando medir en cada uno de ellos, el impacto de las correlaciones entre distintas actividades del proyecto, en la duración total del mismo. Además, se han analizado las variables de sensibilidad como la criticidad, el SSI, y la crucialidad.

Este capítulo se divide en dos apartados, en primer lugar, en 5.1, se presenta el escenario en el cual existe un camino predominante en condiciones sin incertidumbre, y, por otro lado, en 5.2, se presenta el escenario en que los caminos son de la misma duración. Cada uno de estos apartados se estructura como sigue. En la primera sección de cada uno, se pueden apreciar los resultados obtenidos modelando las duraciones de las actividades utilizando la distribución de probabilidad normal, y explorando correlaciones positivas y negativas. El resumen de los escenarios y los casos se puede apreciar en la Tabla 13. En cada caso se analizan las variables de sensibilidad correspondientes, identificando las actividades más influyentes, y su relación con la correlación impuesta. Posteriormente, en la segunda sección, se muestran los resultados del escenario en el cual la duración de las actividades se modela utilizando la distribución de probabilidad triangular.

Tabla 13. Resumen de escenarios.

Escenarios	Función de distribución	Casos	Actividades	Tipo de correlación
Escenario 1 Camino crítico dominante	Normal	Caso 1	-	-
		Caso 2	A1-A2	Fuerte ($\pm 0,8$)
		Caso 3	A1-A3	Fuerte ($\pm 0,8$)
		Caso 4	A1-A4	Fuerte ($\pm 0,8$)
	Triangular	Caso 1	-	-
		Caso 2	A1-A2	Fuerte ($\pm 0,8$)
		Caso 3	A1-A3	Fuerte ($\pm 0,8$)
		Caso 4	A1-A4	Fuerte ($\pm 0,8$)
Escenario 2 Caminos similares	Normal	Caso 1	-	-
		Caso 2	A1-A2	Fuerte ($\pm 0,8$)
		Caso 3	A1-A3	Fuerte ($\pm 0,8$)
		Caso 4	A1-A4	Fuerte ($\pm 0,8$)
	Triangular	Caso 1	-	-
		Caso 2	A1-A2	Fuerte ($\pm 0,8$)
		Caso 3	A1-A3	Fuerte ($\pm 0,8$)
		Caso 4	A1-A4	Fuerte ($\pm 0,8$)

5.1 Camino crítico predominante

En este apartado, se considera un camino predominante de los tres posibles de la red de proyecto mostrada en la Ilustración 10. El camino predominante, en condiciones sin incertidumbre, es el formado por las actividades A1-A4.

5.1.1. Distribución Normal.

Modelando la duración de las actividades del proyecto mediante funciones de distribución normal, la red de proyecto queda como se muestra a continuación en la Ilustración 12. Se puede observar la existencia del camino crítico predominante A1-A4, con una duración determinista de 24,5, mayor que los otros dos caminos posibles, tal y como se ha mostrado en la Tabla 4.

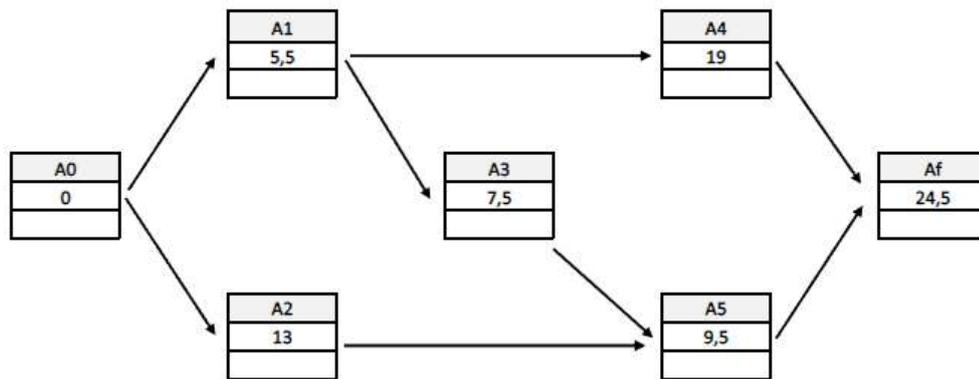


Ilustración 12. Red de proyecto. Camino crítico dominante - Funciones de distribución normal.

Para cada iteración de la simulación, se generaron valores aleatorios de las duraciones de las actividades, siguiendo una distribución de probabilidad normal (simétrica). Con los datos de la Tabla 3, las funciones de distribución de cada actividad quedan modeladas de la siguiente manera (Ilustración 13).

Nombre	Celda	Función	Gráfico	Mínimo	Máximo	Media	Moda	Mediana	Desv. estándar
A1	L4	RiskNormal(E5;G5;RiskName(B5);RiskStatic(0);RiskCormat(Correlaciones1;1))		1,4574	9,1361	5,5000	5,5627	5,4999	1,0003
A4	P4	RiskNormal(E8;G8;RiskName(B8);RiskStatic(0);RiskCormat(Correlaciones1;4))		15,2764	22,8324	19,0000	18,9122	18,9997	1,0000
A3	N9	RiskNormal(E7;G7;RiskName(B7);RiskStatic(0);RiskCormat(Correlaciones1;3))		3,9492	12,6216	7,5003	7,4875	7,4996	1,0011
A2	L14	RiskNormal(E6;G6;RiskName(B6);RiskStatic(0);RiskCormat(Correlaciones1;2))		9,1345	16,7185	13,0000	12,8870	12,9999	1,0001
A5	P14	RiskNormal(E9;G9;RiskName(B9);RiskStatic(0);RiskCormat(Correlaciones1;5))		5,9154	14,3965	9,5003	9,4624	9,4998	1,0008

Ilustración 13. Actividades función distribución normal. Fuente: @Risk.

Considerando en primer lugar, la ausencia de correlación entre actividades del proyecto, se obtiene la función de distribución mostrada en la Ilustración 14.

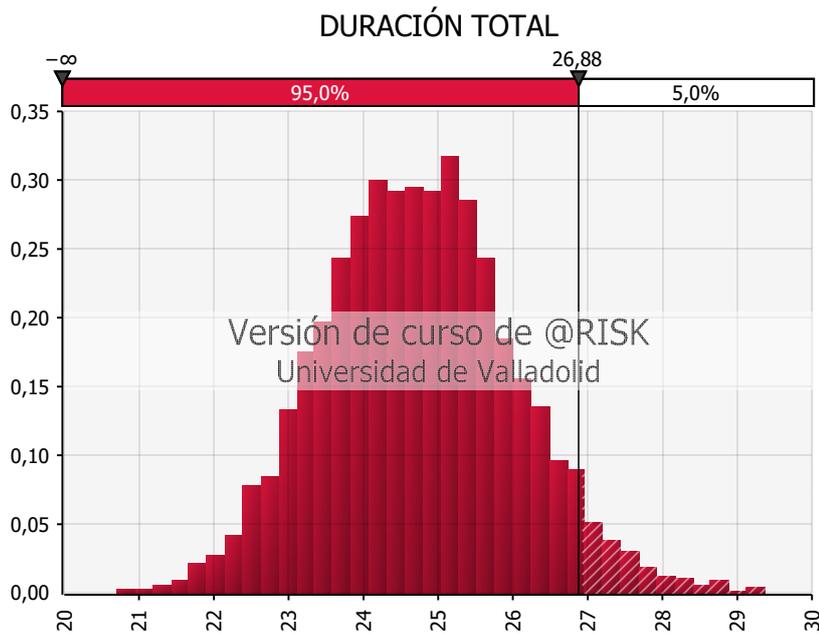


Ilustración 14. Función de distribución proyecto. Camino crítico dominante, funciones de distribución normal. Fuente: @Risk

El percentil 95 de la duración del proyecto, es un valor que indica que la duración total del proyecto en el 95% de las simulaciones, va a ser menor o igual. Es decir, solo en un 5% de las simulaciones, la duración del proyecto superará 26,88 unidades de tiempo (Ilustración 14).

Los estadísticos se aprecian en la Ilustración 15. La duración media del proyecto, modelando la duración de las actividades mediante funciones de distribución normales, y en ausencia de correlación, es de 24,74.

Estadísticos	
	DURACIÓN TOTAL
Celda	R9
Mínimo	20,7077
Máximo	29,3663
Media	24,7354
IC: 90%	± 0,0297
Moda	25,1632
Mediana	24,7076
Desv Est	1,2772
Asimetría	0,1803
Curtosis	3,0768

Ilustración 15. Estadísticos. Camino crítico dominante, funciones de distribución normal sin correlación. Fuente: @Risk.

5.1.1.1 Correlación positiva.

A continuación, se presentan los resultados de la simulación de Monte Carlo aplicada al escenario de un camino dominante. La correlación tenida en cuenta para estas simulaciones es de 0,8 positiva, entre las actividades A1-A2, A1-A3 y A1-A4.

5.1.1.1.1 Resultados de la simulación

Los resultados de la simulación de Monte Carlo se muestran a continuación en la Ilustración 16, Ilustración 17 e Ilustración 18. En estas ilustraciones se pueden apreciar las funciones de distribución de la duración total de cada uno de los casos estudiados, así como los valores de la duración media y del percentil 95, siendo estos los datos más interesantes para el análisis del impacto de la correlación en el proyecto.

Así, por ejemplo, en la Ilustración 16 se ha introducido correlación positiva de 0,8 unidades entre las actividades A1-A2, se puede apreciar que la función de distribución del proyecto resultante se asemeja a una normal. Además, la duración media del proyecto en estas condiciones es de 24,64 unidades de tiempo, y el percentil 95 tiene un valor de 26,93 unidades de tiempo.

El valor de dicho percentil coincide el mostrado en la Ilustración 15 donde no se contemplaba correlación entre actividades, y con la Ilustración 17, donde se presenta la función de distribución del proyecto contemplando correlación entre las actividades A1-A3. Estos resultados son coherentes con el escenario que es objeto de estudio en este apartado, donde se considera el camino A1-A4 como crítico en condiciones deterministas. Se puede apreciar que la correlación entre actividades que no son parte del camino crítico no tiene impacto ni sobre la media ni sobre la desviación o variabilidad de la duración del proyecto.

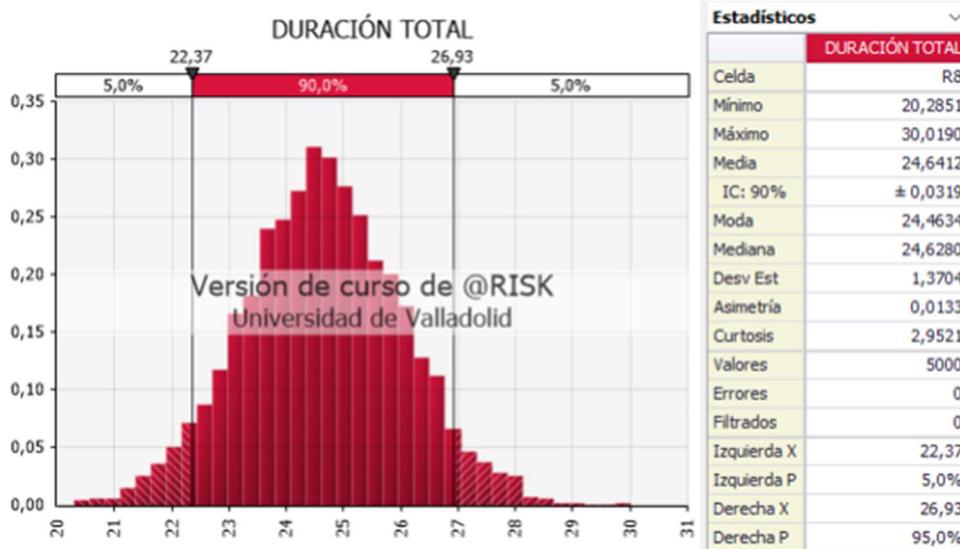


Ilustración 16. Distribución normal. Correlación positiva A1-A2.

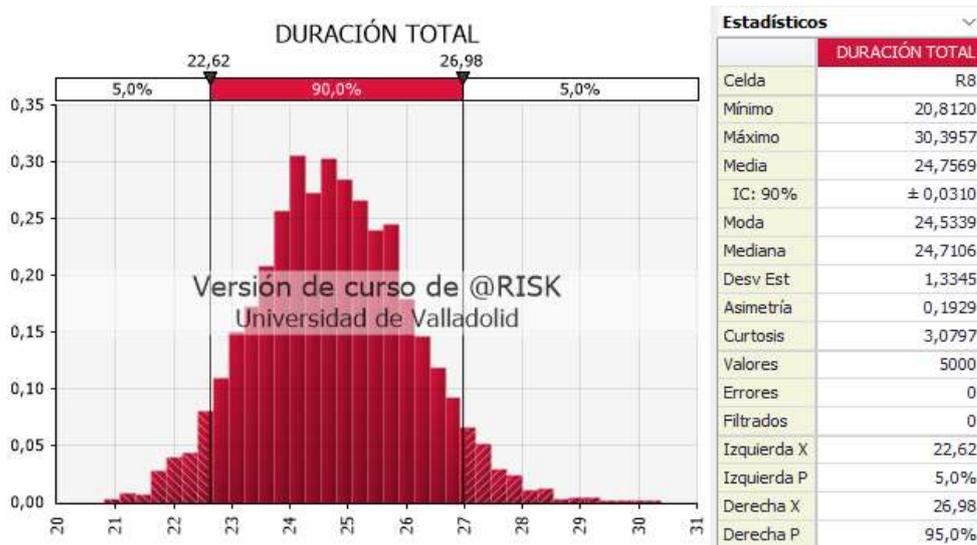


Ilustración 17. Distribución normal. Correlación positiva A1-A3.

Sin embargo, en la Ilustración 18, el valor del percentil 95 asciende a 27,62. Es decir, en el caso de existir correlación positiva entre las actividades del camino dominante, aunque la duración media permanece constante, el percentil aumenta. Esto es un indicador de que la correlación tiene un impacto en la variabilidad del proyecto.

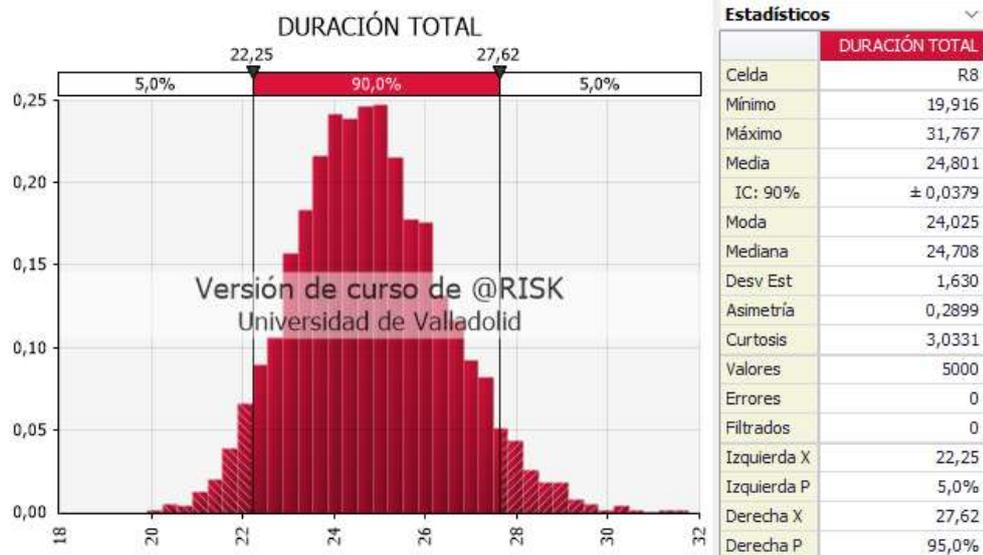


Ilustración 18. Distribución normal. Correlación positiva A1-A4.

5.1.1.1.2 Indicadores de sensibilidad

A continuación, se muestran los valores de los indicadores de sensibilidad estudiados (Índice de Criticidad, Índice de Crucialidad, SSI), en forma de gráfico, lo que permite ver el avance que tienen estos indicadores a lo largo de la simulación en los distintos casos. La leyenda correspondiente a las ilustraciones, haciendo referencia a los casos estudiados, se puede ver detallada a continuación en la Tabla 14.

Tabla 14. Leyenda de las ilustraciones con indicadores de sensibilidad.

Casos estudiados	Detalles del estudio
Caso 1	Sin correlación
Caso 2	Correlación A1-A2
Caso 3	Correlación A1-A3
Caso 4	Correlación A1-A4

En la Ilustración 19 se muestra la criticidad (CI), que vemos que permanece constante en todo momento, siendo las actividades más críticas la A1 y la A4, lo cual es coherente con el escenario presentado en el que se fuerza a que el camino A1-A4 sea el de mayor duración en condiciones deterministas.

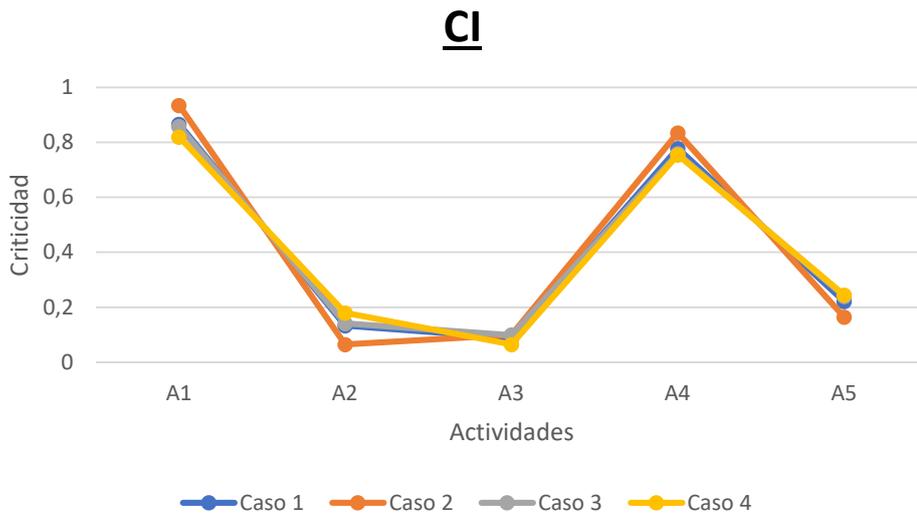


Ilustración 19. Índice de Crucialidad. Camino dominante, distribución normal, correlación positiva.

Por otro lado, en la Ilustración 20 se puede apreciar los valores de la crucialidad. Las actividades con mayor crucialidad son la A1 y la A4. Esta situación, concuerda con el caso de estudio, ya que ambas actividades forman parte del camino crítico dominante. Se aprecia también, que a medida que las actividades se correlacionan con la A1, su índice de crucialidad aumenta con respecto al caso sin correlación (caso 1), y esto se debe a la existencia de correlación positiva entre ellas.

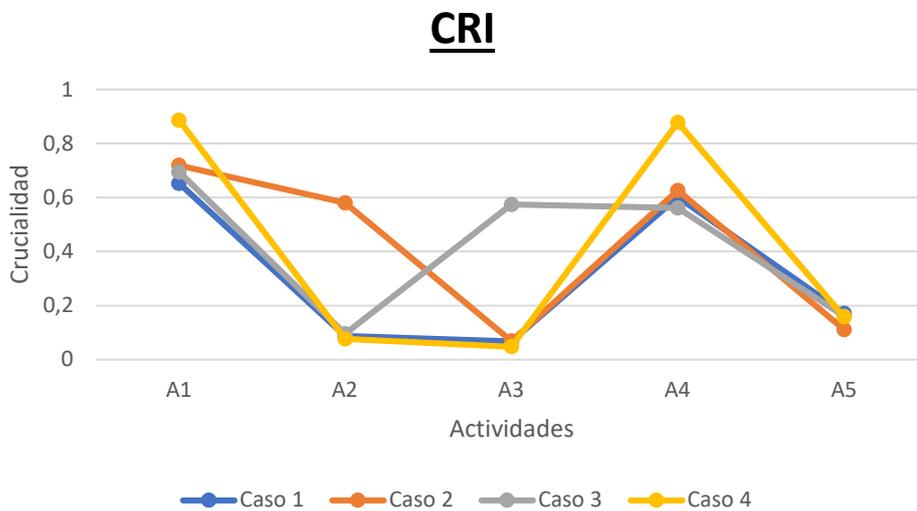


Ilustración 20. Índice de Crucialidad. Camino dominante, distribución normal, correlación positiva.

Por último, en la Ilustración 21 se representan los valores del SSI. La forma de esta gráfica es muy similar a la del índice de criticidad. De nuevo, se confirma el resultado esperado en el escenario en el que estamos en este caso, contando con un camino dominante. Se observa que las actividades con mayor índice son la A1 y A4, lo que confirma que dichas actividades son las más críticas. Sin embargo, en el caso en el que las actividades del camino crítico están correlacionadas positivamente, el SSI disminuye ligeramente.

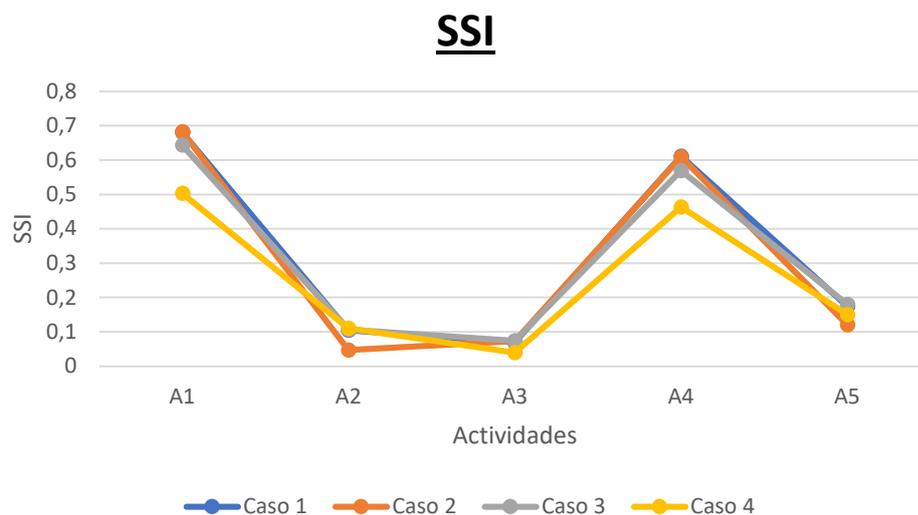


Ilustración 21. SSI. Camino dominante, distribución normal, correlación positiva.

5.1.1.2 Correlación negativa.

A continuación, se presentan los resultados de la simulación de Monte Carlo aplicada al escenario de un camino dominante. La correlación tenida en cuenta para estas simulaciones es de 0,8 negativa, entre las actividades A1-A2, A1-A3 y A1-A4.

5.1.1.2.1 Resultados de la simulación

Los resultados de la simulación de Monte Carlo se muestran a continuación en la Ilustración 22, Ilustración 23 e Ilustración 24. En estas ilustraciones se pueden apreciar las funciones de distribución del proyecto para cada uno de los casos estudiados, así como los valores de la duración media y del percentil 95, siendo estos los datos más interesantes para el análisis del impacto de la correlación en el proyecto.

Los valores del percentil 95 en la Ilustración 22 e Ilustración 23, coinciden con el mostrado en la Ilustración 15 donde no se contemplaba correlación entre actividades. Estos

resultados son coherentes con el escenario que es objeto de estudio en este apartado, donde se considera el camino A1-A4 como crítico en condiciones deterministas. Se puede apreciar que la correlación entre actividades que no son parte del camino crítico no tiene impacto ni sobre la media ni sobre la desviación o variabilidad de la duración del proyecto.

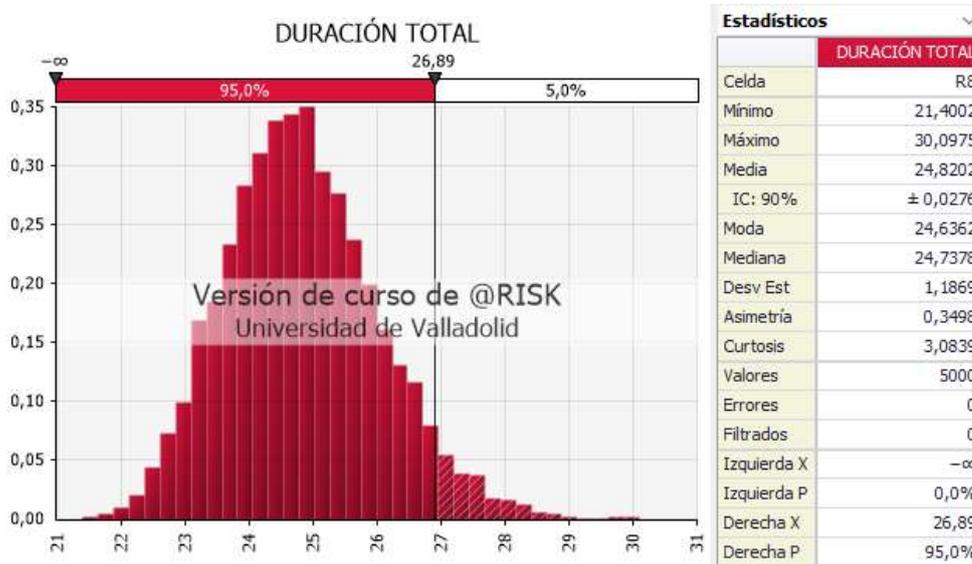


Ilustración 22. Distribución normal. Correlación negativa A1-A2.

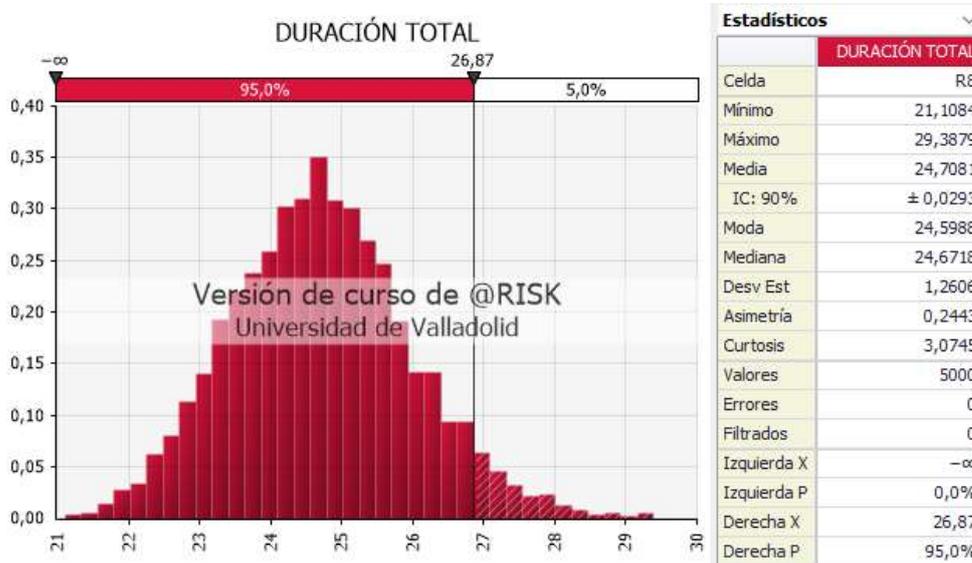


Ilustración 23. Distribución normal. Correlación negativa A1-A3.

Sin embargo, en la Ilustración 24, el valor del percentil 95 desciende a 25,83. Es decir, en el caso de existir correlación negativa entre las actividades del camino dominante, aunque

la duración media permanece constante, el percentil disminuye. Esto es un indicador de que la correlación tiene un impacto en la variabilidad del proyecto.

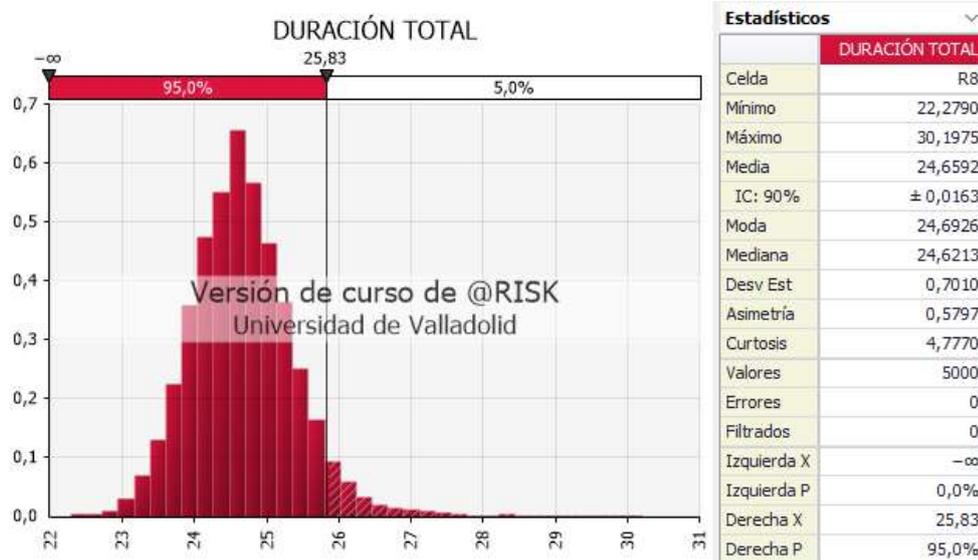


Ilustración 24. Distribución normal. Correlación negativa A1-A4.

5.1.1.2.2 Indicadores de sensibilidad

A continuación, se muestran los valores de los indicadores de sensibilidad estudiados (Índice de Criticidad, Índice de Crucialidad, SSI), en forma de gráfico, lo que permite ver el avance que tienen estos indicadores a lo largo de la simulación en los distintos casos.

En la Ilustración 25 se muestra la criticidad (CI), que vemos que permanece constante en todo momento, siendo las actividades más críticas la A1 y la A4, lo cual es coherente con el escenario presentado en el que se fuerza a que el camino A1-A4 sea el de mayor duración en condiciones deterministas.

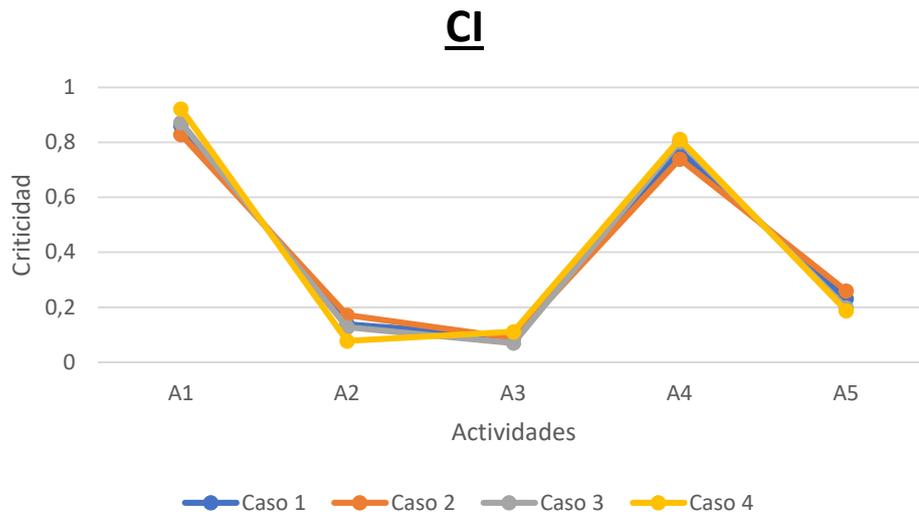


Ilustración 25. Índice de Críticidad. Camino dominante, distribución normal, correlación negativa.

Por otro lado, en la Ilustración 26 se puede apreciar los valores de la crucialidad. Las actividades con mayor crucialidad son la A1 y la A4. Esta situación, cuadra con que sean ambas las actividades que forman parte del camino crítico dominante. Se aprecia también, que a medida que las actividades se correlacionan con la A1, su índice de crucialidad disminuye con respecto al caso sin correlación (caso 1), y esto se debe a la existencia de correlación negativa entre ellas.

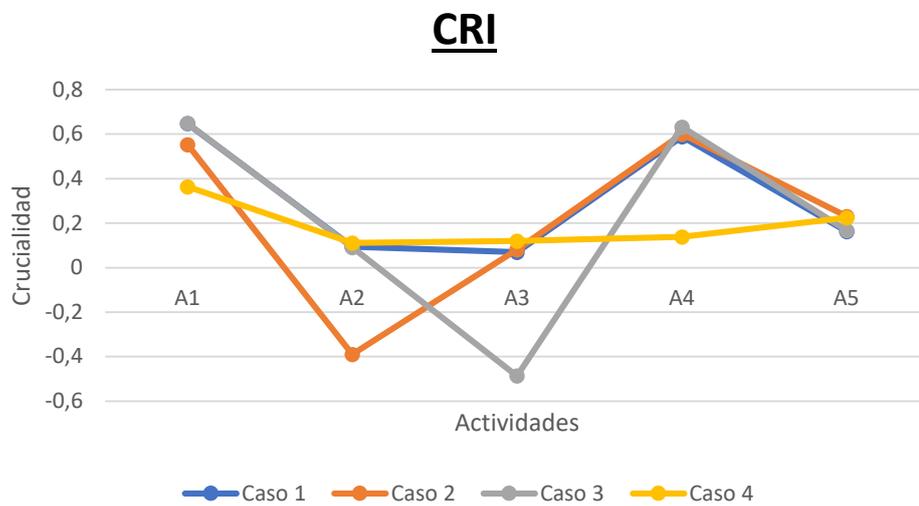


Ilustración 26. Índice de Crucialidad. Camino dominante, distribución normal, correlación negativa.

Por último, en la Ilustración 27 se representan los valores del SSI. La forma de esta gráfica es muy similar a la del índice de criticidad, salvo el caso de correlación entre A1-A4, que hace que se disparen los valores del SSI para ambas actividades. De nuevo, se confirma el resultado esperado en el escenario en el que estamos en este caso, contando con un camino dominante.

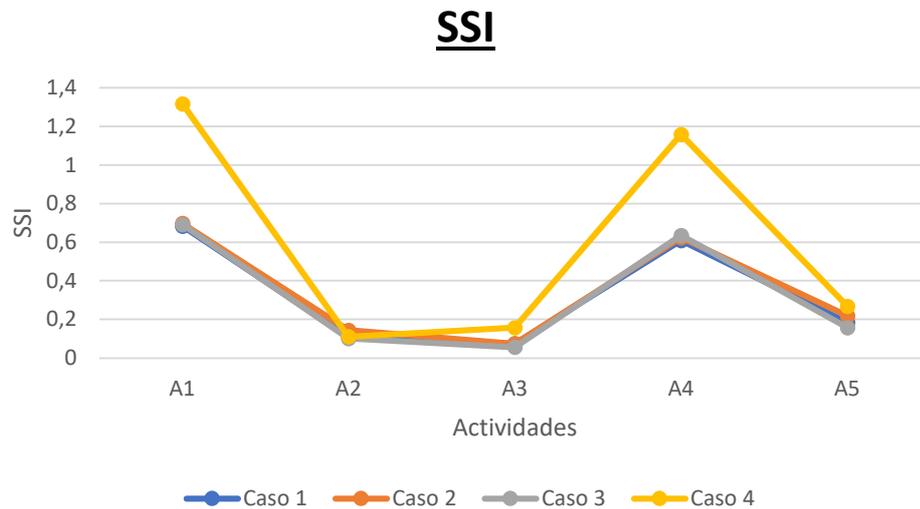


Ilustración 27. SSI. Camino dominante, distribución normal, correlación negativa.

5.1.2. Distribución triangular

A continuación, se muestran los resultados de la simulación modelando la duración de las actividades del proyecto mediante funciones de distribución triangulares. La red de proyecto sería la mostrada en la Ilustración 28, dónde se puede apreciar que los tres caminos posibles son de igual duración, 22,5 unidades de tiempo, en condiciones deterministas.

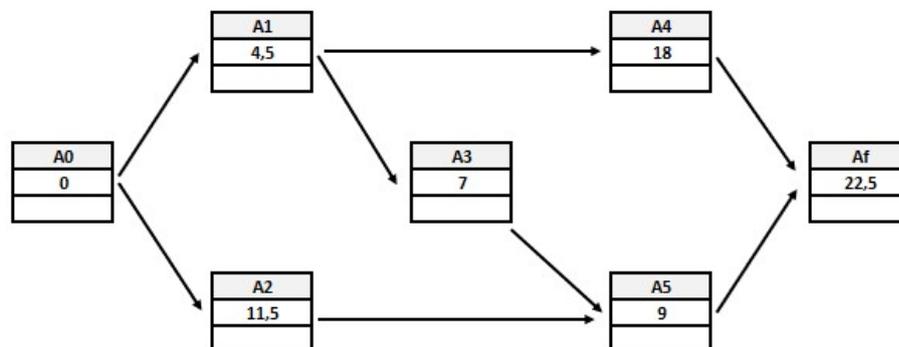


Ilustración 28. Red de proyecto. Camino crítico dominante - Funciones de distribución triangular.

Para cada iteración de la simulación, se generaron valores aleatorios de las duraciones de las actividades, siguiendo una distribución de probabilidad triangular (no simétrica). Con los datos de la Tabla 5, las funciones de distribución de cada actividad quedan modeladas de la siguiente manera (Ilustración 29).

Nombre	Celda	Función	Gráfico	Mínimo	Máximo	Media	Moda	Mediana	Desv. estándar
A1	L3	RiskTriang(D4;E4;F4;RiskName(B4);RiskStatic(0);RiskCorrmatt(Correlaciones 1;1))		4,0112	7,9762	5,5000	4,5201	5,3540	0,8898
A4	P3	RiskTriang(D7;E7;F7;RiskName(B7);RiskStatic(0);RiskCorrmatt(Correlaciones 1;4))		17,0226	21,9889	19,0000	18,0125	18,8371	1,0802
A3	N8	RiskTriang(D6;E6;F6;RiskName(B6);RiskStatic(0);RiskCorrmatt(Correlaciones 1;3))		6,5158	8,9780	7,5000	6,9937	7,4186	0,5401
A2	L13	RiskTriang(D5;E5;F5;RiskName(B5);RiskStatic(0);RiskCorrmatt(Correlaciones 1;2))		11,0084	16,4290	13,0000	11,5389	12,7915	1,2417
A5	P13	RiskTriang(D8;E8;F8;RiskName(B8);RiskStatic(0);RiskCorrmatt(Correlaciones 1;5))		8,5087	10,9747	9,5000	9,0063	9,4186	0,5401

Ilustración 29. Actividades función distribución triangular. Fuente: @Risk.

Considerando en primer lugar, la ausencia de correlación entre actividades del proyecto, se obtiene la función de distribución mostrada en la Ilustración 30.

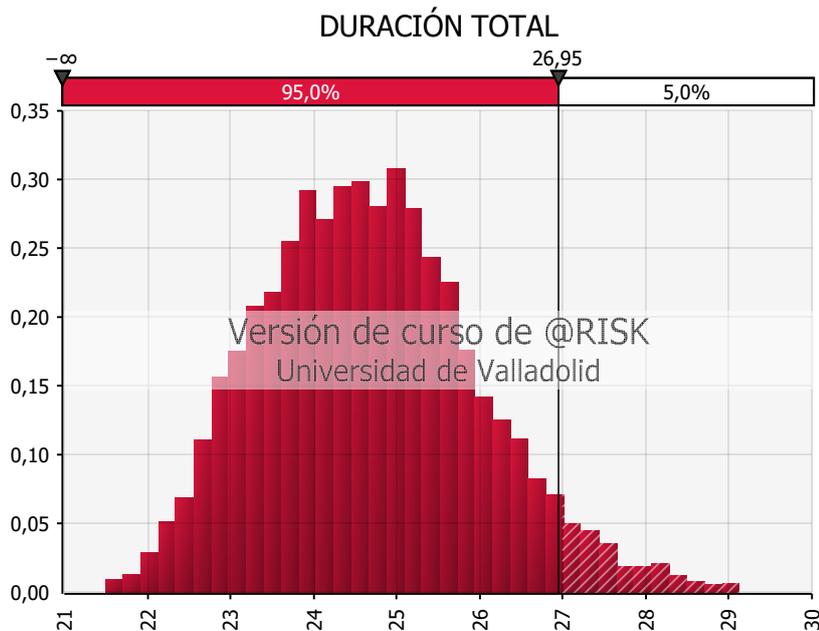


Ilustración 30. Función de distribución proyecto. Camino crítico dominante, funciones de distribución triangular. Fuente: @Risk

La forma de la función de distribución del proyecto, así como el valor del percentil 95, es similar a lo obtenido en el caso anterior donde modelábamos las duraciones de las actividades mediante funciones de distribución normales (Ilustración 14).

Los estadísticos se aprecian en la Ilustración 31. La duración media del proyecto, modelando la duración de las actividades mediante funciones de distribución triangulares, y en ausencia de correlación, es de 24,67.

Estadísticos	
	DURACIÓN TOTAL
Celda	R8
Mínimo	21,4958
Máximo	29,1289
Media	24,6726
IC: 90%	± 0,0303
Moda	24,3184
Mediana	24,6069
Desv Est	1,3006
Asimetría	0,3602
Curtosis	2,9726

Ilustración 31. Estadísticos. Camino crítico dominante, funciones de distribución triangular sin correlación. Fuente: @Risk.

5.1.2.1 Correlación positiva

A continuación, se presentan los resultados de la simulación de Monte Carlo aplicada al escenario de un camino dominante. La correlación tomada en cuenta para estas simulaciones es de 0,8 positiva, entre las actividades A1-A2, A1-A3 y A1-A4.

5.1.2.1.1 Resultados de la simulación

Los resultados de la simulación de Monte Carlo se muestran a continuación en la Ilustración 32, Ilustración 33 e Ilustración 34. En estas ilustraciones se pueden apreciar las funciones de distribución del proyecto para cada uno de los casos estudiados, así como los valores de la duración media y del percentil 95, siendo estos los datos más interesantes para el análisis del impacto de la correlación en el proyecto.



Ilustración 32. Distribución triangular. Correlación positiva A1-A2.

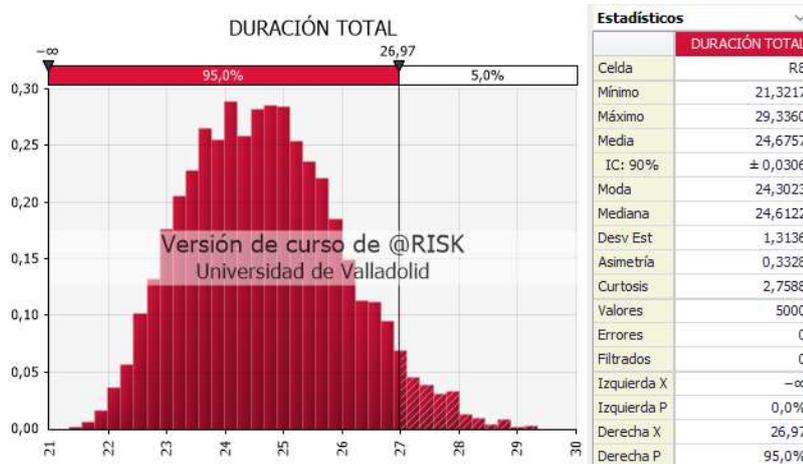


Ilustración 33. Distribución triangular. Correlación positiva A1-A3.

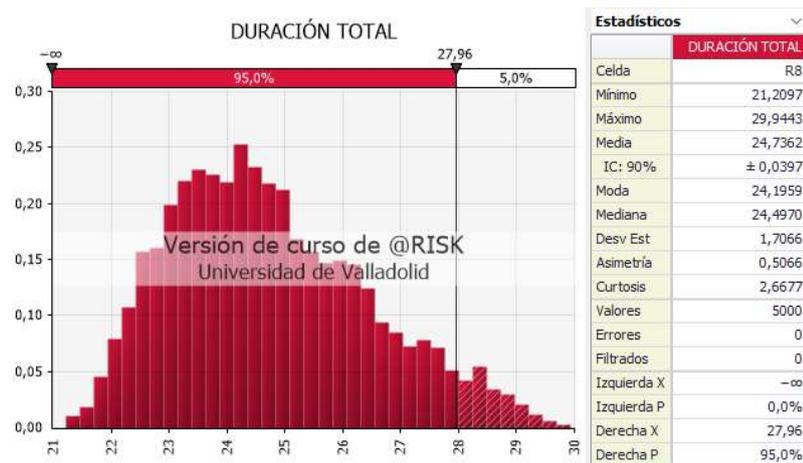


Ilustración 34. Distribución triangular. Correlación positiva A1-A4.

5.1.2.1.2 Indicadores de sensibilidad

A continuación, se muestran los valores de los indicadores de sensibilidad estudiados (Índice de Criticidad, Índice de Crucialidad, SSI), en forma de gráfico, lo que permite ver el avance que tienen estos indicadores a lo largo de la simulación en los distintos casos.

En la Ilustración 35 se muestra la criticidad (CI), que vemos que permanece constante en todo momento, siendo las actividades más críticas la A1 y la A4, lo cual es coherente con el escenario presentado en el que se fuerza a que el camino A1-A4 sea el de mayor duración en condiciones deterministas.

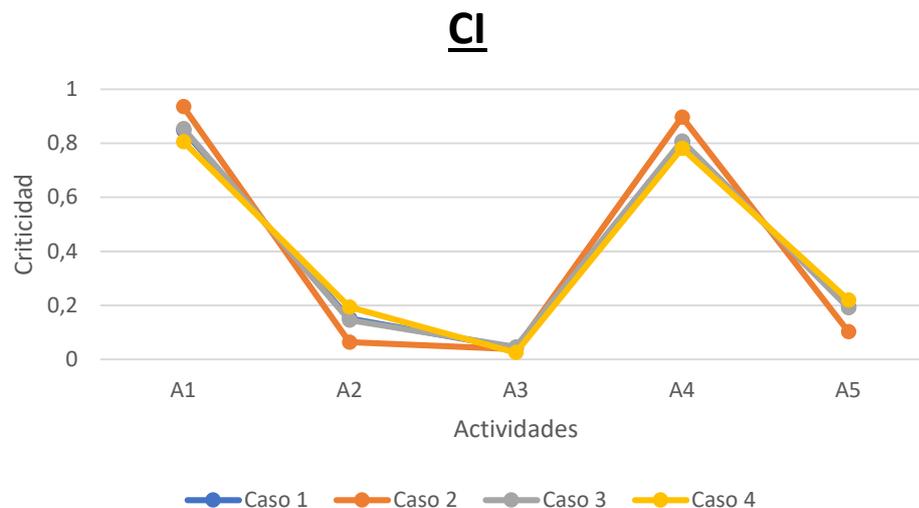


Ilustración 35. Índice de Criticidad. Camino dominante, distribución triangular, correlación positiva.

Por otro lado, en la Ilustración 36 se puede apreciar los valores de la crucialidad. Las actividades con mayor crucialidad son la A1 y la A4. Esta situación, cuadra con que sean ambas las actividades que forman parte del camino crítico dominante. Se aprecia también, que a medida que las actividades se correlacionan con la A1, su índice de crucialidad aumenta con respecto al caso sin correlación (caso 1), y esto se debe a la existencia de correlación positiva entre ellas.

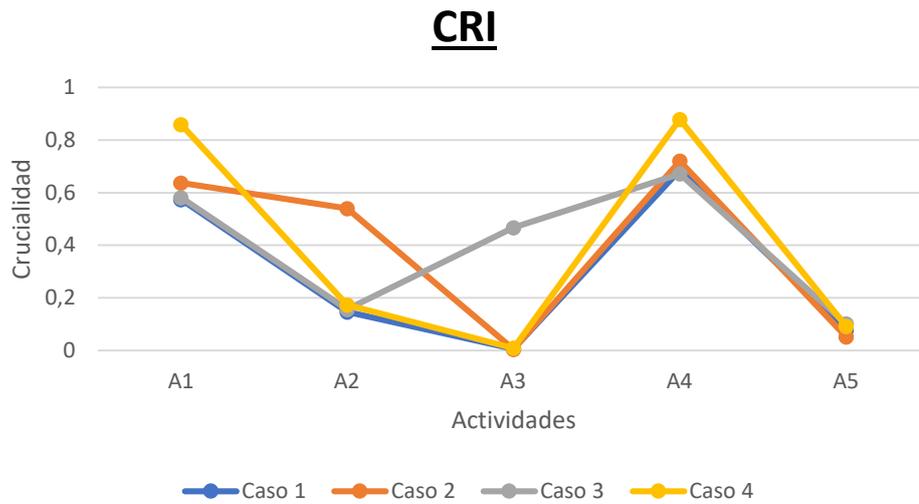


Ilustración 36. Índice de Crucialidad. Camino dominante, distribución triangular, correlación positiva.

Por último, en la Ilustración 37 se representan los valores del SSI. La forma de esta gráfica es muy similar a la del índice de criticidad, pero de nuevo, cuando existe correlación entre las actividades del camino crítico, su SSI desciende ligeramente. Las actividades con mayor SSI siguen siendo la A1 y A4.

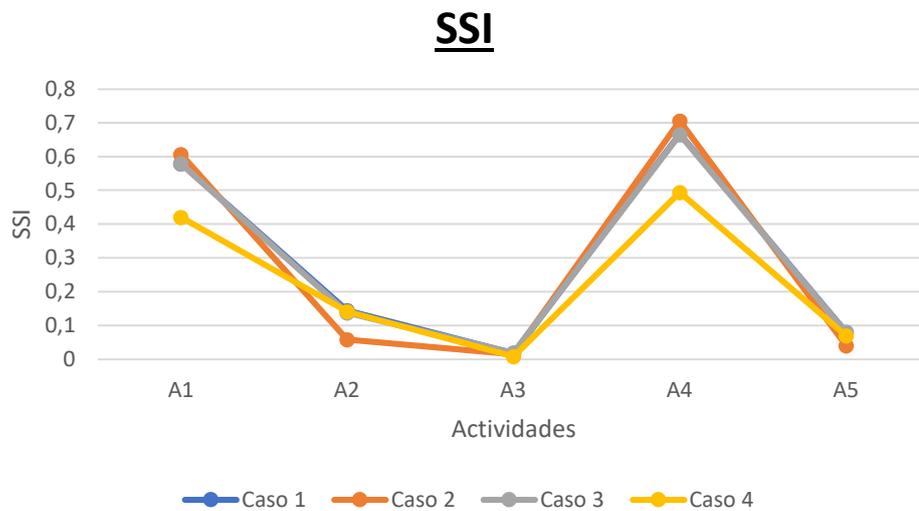


Ilustración 37. SSI. Camino dominante, distribución triangular, correlación positiva.

5.1.2.2 Correlación negativa

A continuación, se presentan los resultados de la simulación de Monte Carlo aplicada al escenario de un camino dominante. La correlación tenida en cuenta para estas simulaciones es de 0,8 positiva, entre las actividades A1-A2, A1-A3 y A1-A4.

5.1.2.2.1 Resultados de la simulación

Los resultados de la simulación de Monte Carlo se muestran a continuación en la Ilustración 38, Ilustración 39 e Ilustración 40. En estas ilustraciones se pueden apreciar las funciones de distribución del proyecto para cada uno de los casos estudiados, así como los valores de la duración media y del percentil 95, siendo estos los datos más interesantes para el análisis del impacto de la correlación en el proyecto.

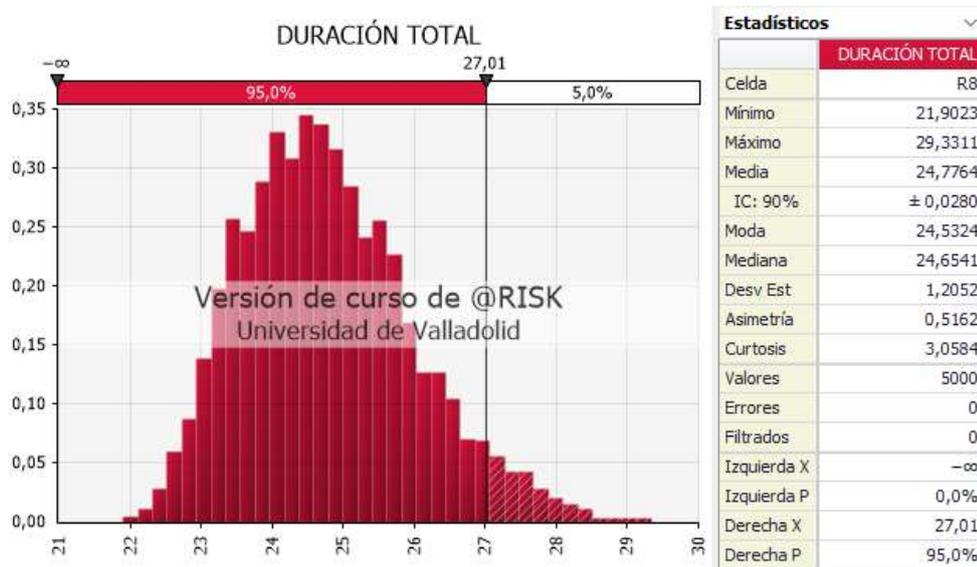


Ilustración 38. Distribución triangular. Correlación negativa A1-A2.

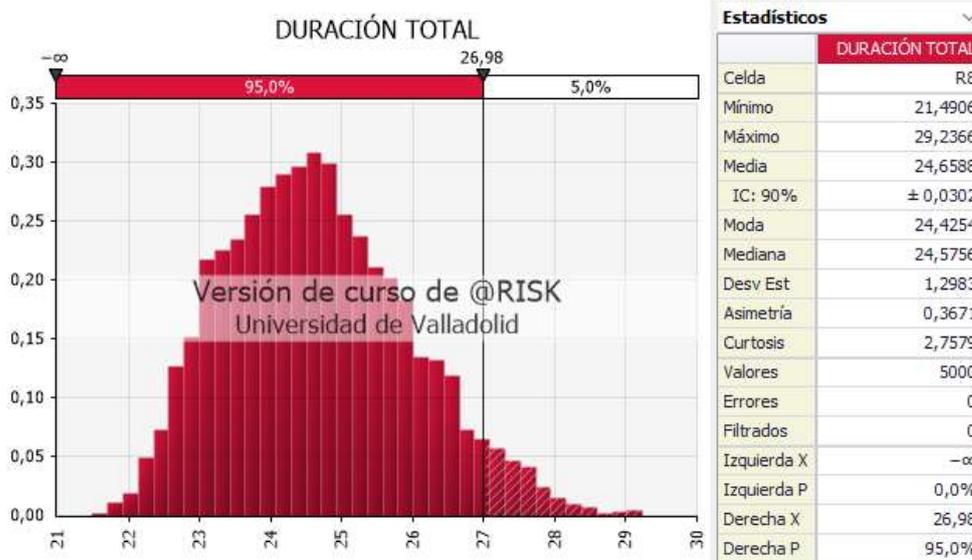


Ilustración 39. Distribución triangular. Correlación negativa A1-A3.

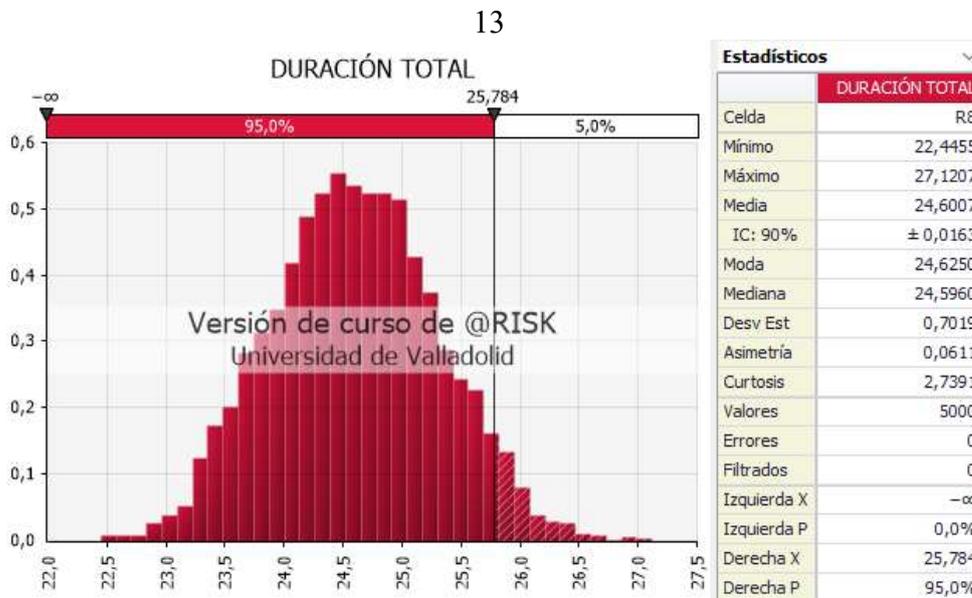


Ilustración 40. Distribución triangular. Correlación negativa A1-A4.

5.1.2.2.2 *Indicadores de sensibilidad*

A continuación, se muestran los valores de los indicadores de sensibilidad estudiados (Índice de Criticidad, Índice de Crucialidad, SSI), en forma de gráfico, lo que permite ver el avance que tienen estos indicadores a lo largo de la simulación en los distintos casos.

En la Ilustración 41 se muestra la criticidad (CI), que vemos que permanece constante en todo momento, siendo las actividades más críticas la A1 y la A4, lo cual es coherente con el escenario presentado en el que se fuerza a que el camino A1-A4 sea el de mayor duración en condiciones deterministas.

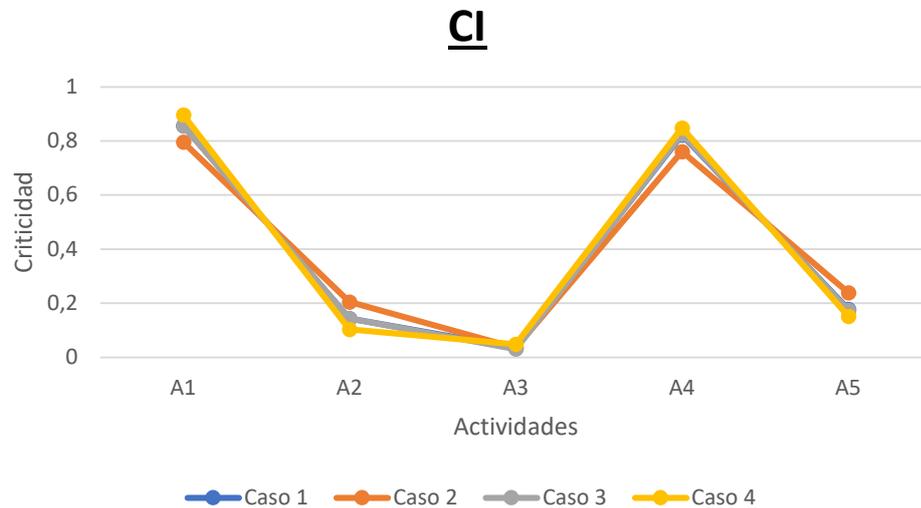


Ilustración 41. Índice de Criticidad. Camino dominante, distribución triangular, correlación negativa.

Por otro lado, en la Ilustración 42 se puede apreciar los valores de la crucialidad. Las actividades con mayor crucialidad son la A1 y la A4. Esta situación, cuadra con que sean ambas las actividades que forman parte del camino crítico dominante. Se aprecia también, que a medida que las actividades se correlacionan con la A1, su índice de crucialidad disminuye con respecto al caso sin correlación (caso 1), y esto se debe a la existencia de correlación negativa entre ellas.

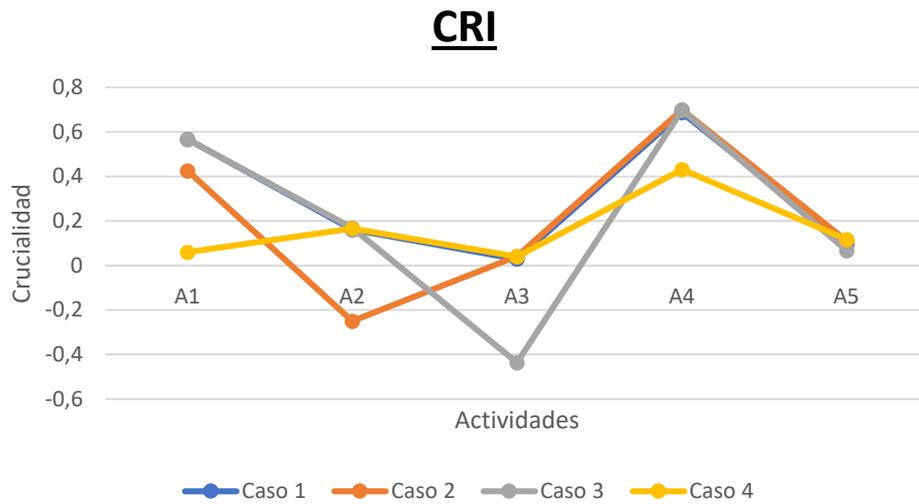


Ilustración 42. Índice de Crucialidad. Camino dominante, distribución triangular, correlación negativa.

Por último, en la Ilustración 43 se representan los valores del SSI. La forma de esta gráfica es muy similar a la del índice de criticidad, salvo el caso de correlación entre A1-A4, que hace que se disparen los valores del SSI para ambas actividades. De nuevo, se confirma el resultado esperado en el escenario en el que estamos en este caso, contando con un camino dominante.

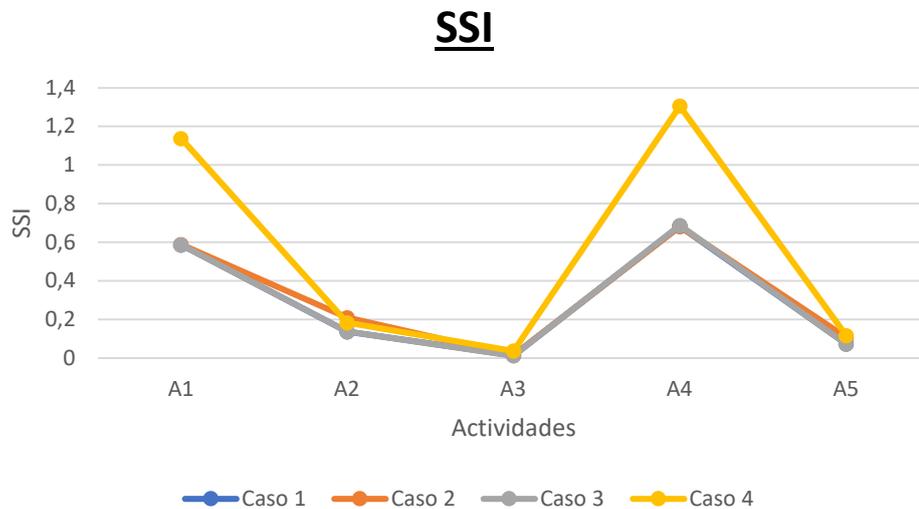


Ilustración 43. SSI. Camino dominante, distribución triangular, correlación negativa.

5.1.3. Estadísticos

Tras la simulación del primer escenario contemplado, en el cuál contábamos con un camino crítico dominante (A1-A4) se han obtenido los siguientes estadísticos. Para esta simulación se ha modelado la duración de las actividades del proyecto utilizando funciones de distribución normal y triangular, además de introducir correlación positiva y negativa entre algunas actividades, como se ha mostrado anteriormente.

En primer lugar, la media de la duración total del proyecto para cada uno de los casos, visible en la Ilustración 44. El gráfico contempla la estimación de la duración media del proyecto, considerando las incertidumbres y correlaciones entre actividades, y se aprecia que la duración del proyecto casi no sufre variaciones.

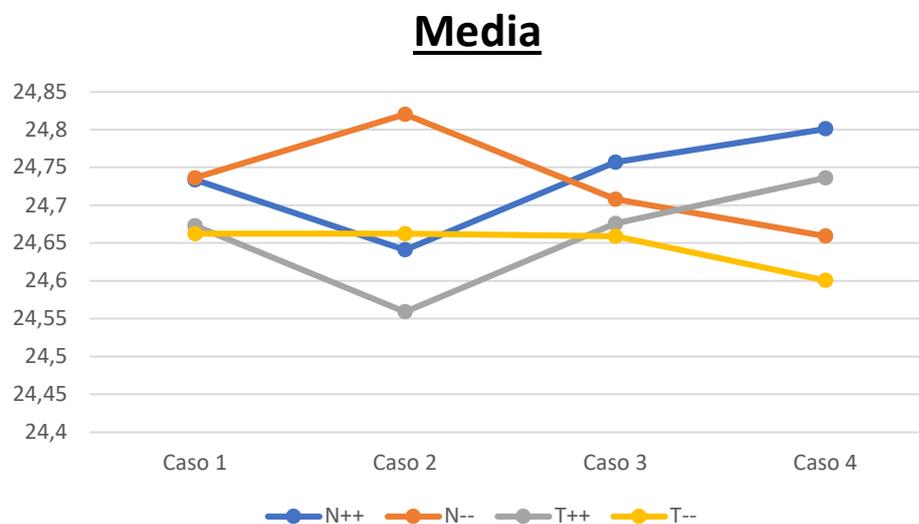


Ilustración 44. Camino dominante. Media de las simulaciones.

La escasa variación de la duración media del proyecto es debida a las propias funciones de distribución, y a la definición de correlación.

Tomando como ejemplo una situación en la que existe correlación positiva entre dos actividades, eso se traduce en que el aumento en la duración de una actividad, provocaría un aumento en la duración de su actividad correlacionada. En nuestras simulaciones, las duraciones de las actividades vienen modeladas según las diversas funciones de distribución explicadas. El hecho de que exista correlación positiva entre dos actividades modeladas por ejemplo mediante una función de distribución triangular, provocaría que las duraciones de dichas actividades tomaran, a priori, valores desplazados hacia la derecha. Esto se refiere a que si una actividad tiene un valor de duración grande (dentro de los límites marcados por su función de distribución), la actividad que está correlacionada con ella

positivamente, también tendrá un valor de duración alto, dentro también del rango de duraciones correspondiente a la función de probabilidad de esta última actividad.

Sin embargo, debido a la utilización de simulación de Monte Carlo, y a realizar 5.000 iteraciones en cada simulación, se termina abarcando todo el espectro de duraciones contemplado en la función de distribución, y la existencia de correlación positiva entre actividades no influye en que se acabe compensando la duración media, ya que a lo largo de las 5.000 simulaciones, se acaba cubriendo todo el abanico de posibles valores para la duración de cada actividad.

Esto provoca que, siguiendo en el caso de correlación positiva entre dos actividades, cuando la primera de ellas tome un valor pequeño, la siguiente actividad también tomará un valor pequeño, y cuando tome un valor grande, también tomará un valor grande. En caso de existir correlación negativa entre actividades, la situación es la inversa. Cuando una actividad tome un valor pequeño, la otra actividad tomará un valor grande, y viceversa, llegando a la misma situación que se presenta en el caso de correlación positiva, en el que se acaba compensando los valores de las actividades, y por tanto, la duración media del proyecto apenas sufre alteración.

En segundo lugar, el percentil 95 (Ilustración 45), indicador que mide el valor por debajo del cual se observan el 95% de las observaciones. En este contexto, el percentil 95 indica que la duración de los proyectos simulados ha tenido un valor igual o menor el 95% de las simulaciones.

Analizando el gráfico, vemos que el valor del percentil 95 se mantiene constante salvo cuando se correlacionan las actividades A1-A4. Esto es coherente ya que estamos considerando un escenario en el cual el camino A1-A4 es crítico en condiciones deterministas. Por ello, es en este caso donde mejor se mide el impacto de la correlación. Vemos que en los casos en los que la correlación es positiva (colores azul y gris en Ilustración 45), el valor del percentil 95 aumenta. Eso se traduce en un mayor riesgo, ya que hay una mayor probabilidad de que la duración del proyecto sea mayor, lo que permite concluir que la correlación entre actividades del camino crítico tiene un impacto en la variabilidad de la duración del proyecto. Por otro lado, en los casos con correlación negativa (colores naranja y amarillo), el valor del percentil 95 disminuye, aumentando la confianza en que la duración del proyecto será menor, en caso de existir correlación negativa.

Percentil 95

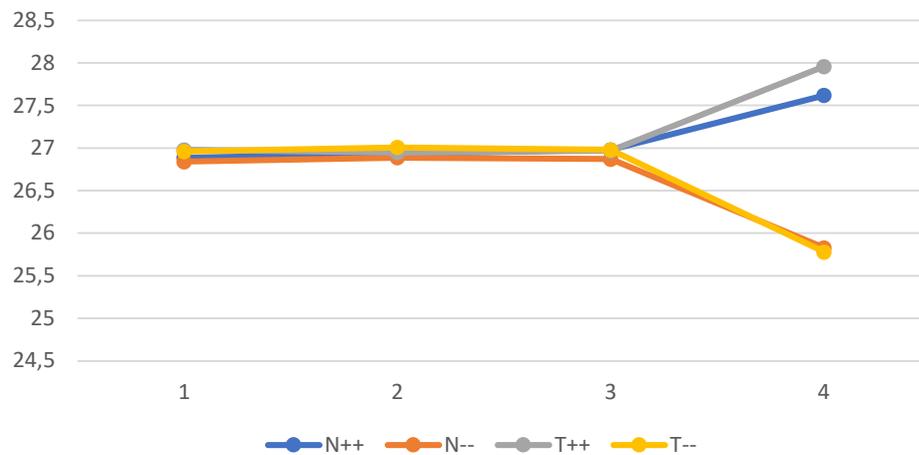


Ilustración 45. Camino dominante. Percentil 95.

La desviación estándar, sacada en este caso de la duración del proyecto, permite medir cuánto se alejan los datos de la media, es decir, aporta información sobre la variabilidad de la duración del proyecto (Ilustración 46). De igual forma que con el percentil 95, se aprecia que la desviación aumenta en los casos de correlación positiva, y disminuye en los casos de correlación negativa. Esto permite reafirmar las conclusiones extraídas anteriormente de que la correlación tiene un impacto en la variabilidad de la duración del proyecto.

Desv. Estándar

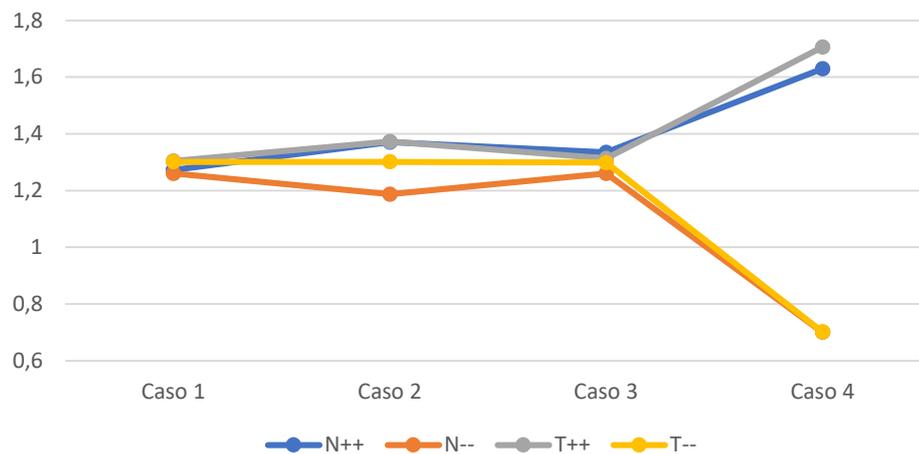


Ilustración 46. Camino dominante. Desviación estándar de las simulaciones.

Otro estadístico medido es la asimetría, visible en la Ilustración 47. La asimetría es una medida que evalúa la distribución de los datos en relación con su simetría. Un valor de asimetría cercana a cero indica una distribución aproximadamente simétrica.

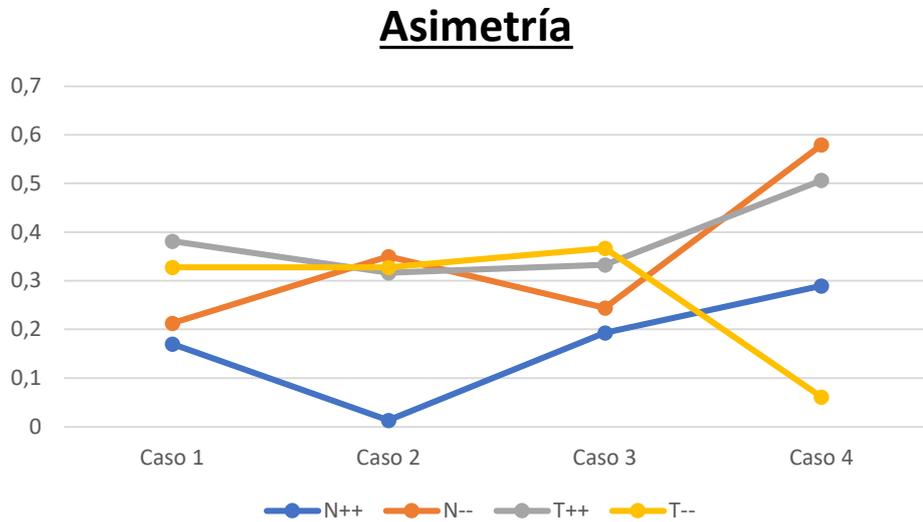


Ilustración 47. Camino dominante. Asimetría de las simulaciones.

Por último, la curtosis, mostrada en la Ilustración 48, que es una medida que describe la forma de la distribución de los datos en relación con una distribución normal. Una medida de curtosis positiva indica que los valores tienen a concentrarse alrededor de la media.

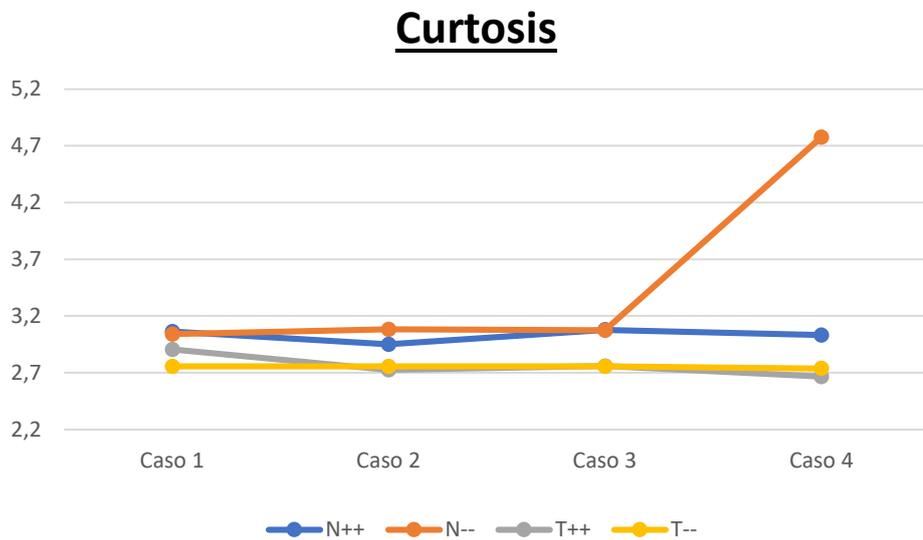


Ilustración 48. Camino dominante. Curtosis de las simulaciones.

5.2 Caminos de igual duración

En este apartado, se considera el escenario en el cuál todos los caminos posibles de la red de proyecto (Ilustración 10) tienen la misma duración. Es decir, el camino A1-A4, A1-A3-A5 y A2-A5, en condiciones deterministas, serán críticos.

5.2.1. Distribución normal

Modelando la duración de las actividades del proyecto mediante funciones de distribución normal, la red de proyecto queda como se muestra a continuación en la Ilustración 49. Se puede observar que todos los caminos posibles duran lo mismo, con una duración determinista de 22,5, tal y como se ha mostrado en la Tabla 8.

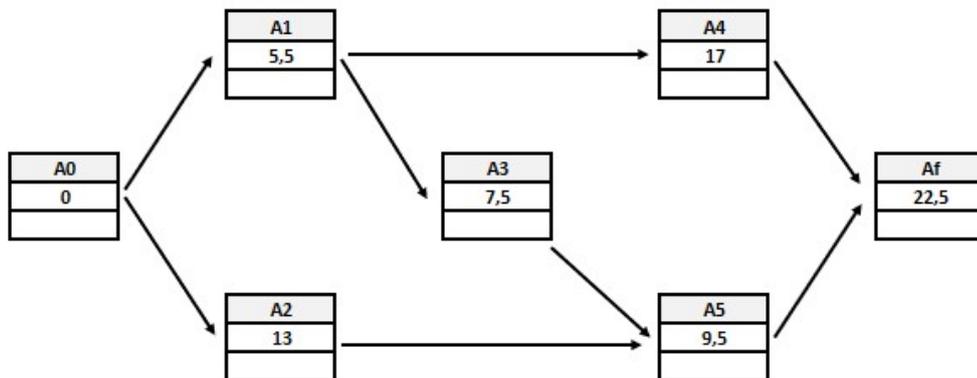


Ilustración 49. Red de proyecto. Caminos iguales - Funciones de distribución normal.

Para cada iteración de la simulación, se generaron valores aleatorios de las duraciones de las actividades, siguiendo una distribución de probabilidad normal (simétrica). Con los datos de la Tabla 7, las funciones de distribución de cada actividad quedan modeladas de la siguiente manera (Ilustración 50).

Nombre	Celda	Función	Gráfico	Mínimo	Máximo	Media	Moda	Mediana	Desv. estándar
A1	L3	RiskNormal(E4;G4;RiskName(B4);RiskStabic(0);RiskCorrmat(Correlaciones1;1))		1,8090	9,2502	5,5000	5,4624	5,4999	0,9999
A4	P3	RiskNormal(E7;G7;RiskName(B7);RiskStabic(0);RiskCorrmat(Correlaciones1;4))		12,9831	20,7732	17,0000	17,0125	16,9998	1,0002
A3	N8	RiskNormal(E6;G6;RiskName(B6);RiskStabic(0);RiskCorrmat(Correlaciones1;3))		3,7164	11,2395	7,5000	7,4624	7,4999	0,9999
A2	L13	RiskNormal(E5;G5;RiskName(B5);RiskStabic(0);RiskCorrmat(Correlaciones1;2))		9,2487	17,3066	13,0001	13,0125	12,9995	1,0003
A5	P13	RiskNormal(E8;G8;RiskName(B8);RiskStabic(0);RiskCorrmat(Correlaciones1;5))		5,8865	13,5816	9,5001	9,4624	9,4998	1,0002

Ilustración 50. Actividades función distribución normal. Fuente: @Risk.

Considerando en primer lugar, la ausencia de correlación entre actividades del proyecto, se obtiene la función de distribución mostrada en la Ilustración 51. El percentil 95, en este escenario sin correlación en el que partimos de tres caminos críticos igual de posibles, es de 25,74.

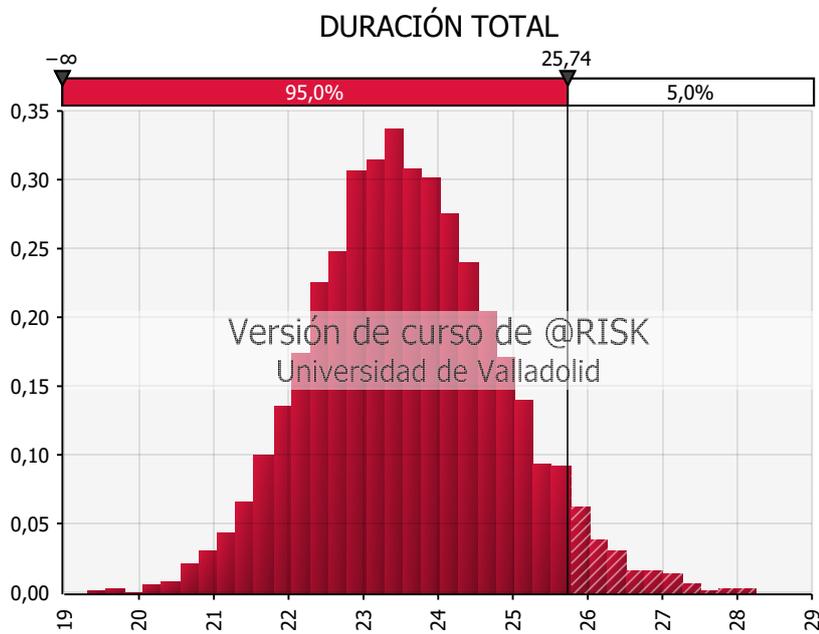


Ilustración 51. Función de distribución proyecto. Caminos iguales, funciones de distribución normal.
Fuente: @Risk.

Los estadísticos se aprecian en la Ilustración 52. La duración media del proyecto, modelando la duración de las actividades mediante funciones de distribución normales, y en ausencia de correlación, es de 23,59.

Estadísticos	
	DURACIÓN TOTAL
Celda	R8
Mínimo	19,3110
Máximo	28,2536
Media	23,5900
IC: 90%	± 0,0292
Moda	23,4545
Mediana	23,5321
Desv Est	1,2541
Asimetría	0,2062
Curtosis	3,1109

Ilustración 52. Estadísticos. Caminos iguales, funciones de distribución normal sin correlación. Fuente: @Risk.

5.2.1.1 Correlación positiva

A continuación, se presentan los resultados de la simulación de Monte Carlo aplicada al escenario en el cual los tres caminos posibles tienen la misma duración. La correlación tenida en cuenta para estas simulaciones es de 0,8 positiva, entre las actividades A1-A2, A1-A3 y A1-A4.

5.2.1.1.1 Resultados de la simulación

Los resultados de la simulación de Monte Carlo se muestran a continuación en la Ilustración 53, Ilustración 54 e Ilustración 55. En estas ilustraciones se pueden apreciar las funciones de distribución del proyecto para cada uno de los casos estudiados, así como los valores de la duración media y del percentil 95, siendo estos los datos más interesantes para el análisis del impacto de la correlación en el proyecto.

Los resultados muestran que la correlación entre las distintas actividades, pertenezcan al mismo camino o no lo hagan, no modifica los valores ni de la media ni del percentil 95. Al considerar caminos de igual duración, durante la simulación, cada vez es un camino el que resulta ser crítico, lo que provoca que se difuminen los efectos de la correlación, ya que en ocasiones, la correlación esté presente entre actividades que forman parte del camino crítico, pero en otras no. Por ello, en las ilustraciones de la parte inferior no se aprecian variaciones en los percentiles, mientras que, en el primer escenario, donde se consideraba un camino dominante, la correlación entre actividades sí que mostraba un claro impacto en la variabilidad de la confianza en la duración del proyecto (Ilustración 18).

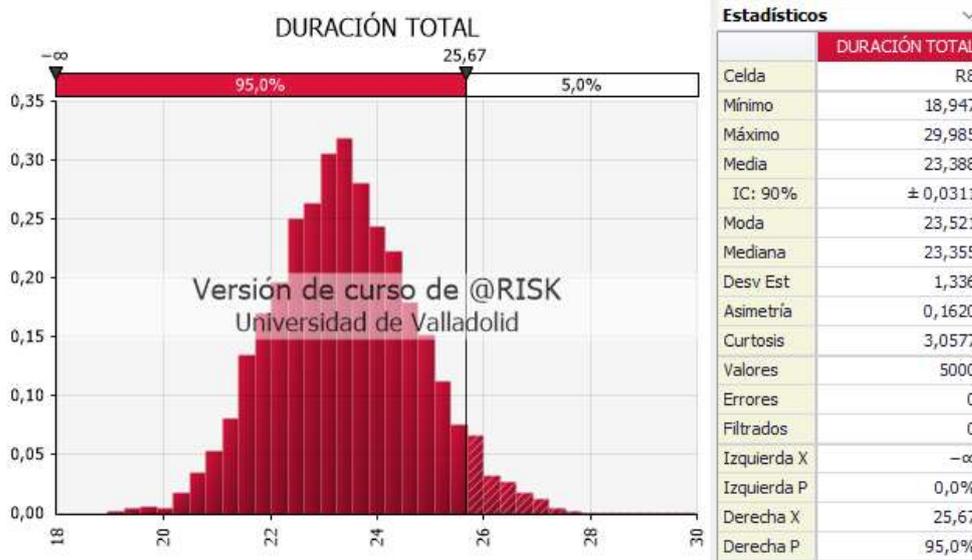


Ilustración 53. Distribución normal. Correlación positiva A1-A2.

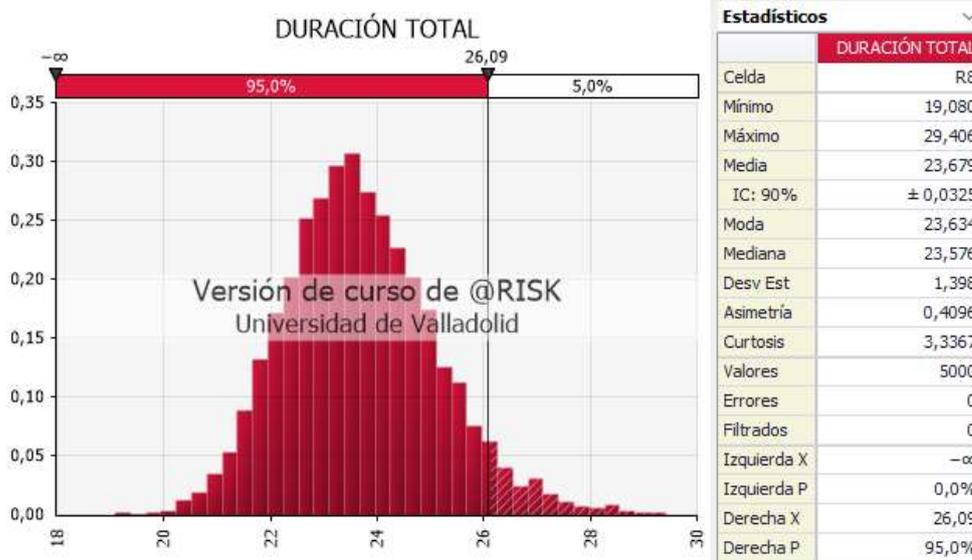


Ilustración 54. Distribución normal. Correlación positiva A1-A3.

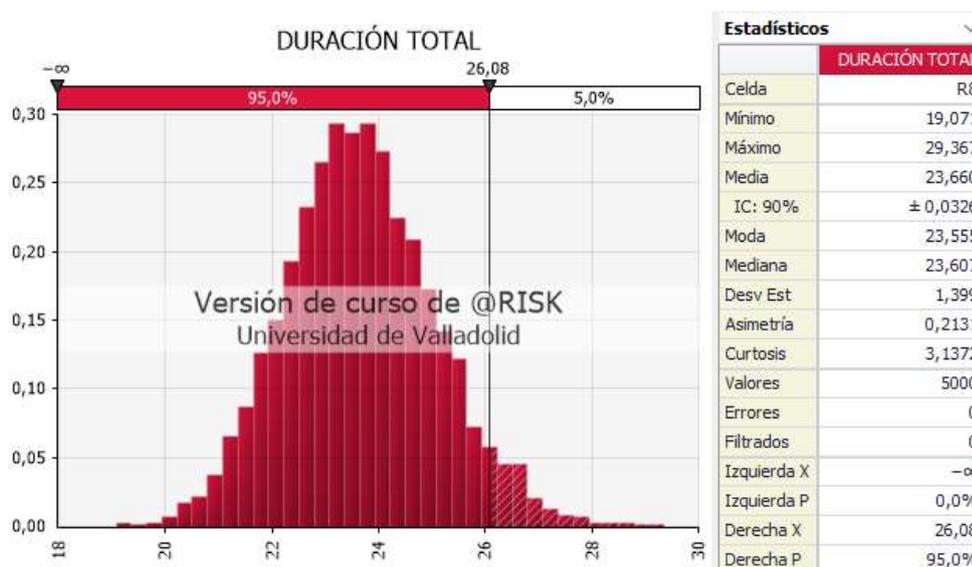


Ilustración 55. Distribución normal. Correlación positiva A1-A4.

5.2.1.1.2 Indicadores de sensibilidad

A continuación, se muestran los valores de los indicadores de sensibilidad estudiados (Índice de Criticidad, Índice de Crucialidad, SSI), en forma de gráfico, lo que permite ver el avance que tienen estos indicadores a lo largo de la simulación en los distintos casos.

En la Ilustración 56 se muestra la criticidad (CI), que vemos que para cada actividad su valor permanece constante en todos los casos simulados, es decir, la correlación no tiene impacto sobre la criticidad. En este escenario los valores de la criticidad están más repartidos, lo cual es coherente con el escenario considerado, donde los tres caminos posibles de la red del proyecto, son iguales en condiciones sin incertidumbre. Sin embargo, cabe destacar que la actividad A1, y la A5 son las de mayor índice.

A nivel informativo, volvemos a recordar la leyenda correspondiente a las ilustraciones, detallando qué tipo de correlación existe en cada caso.

Tabla 15. Leyenda de las ilustraciones con indicadores de sensibilidad.

Casos estudiados	Detalles del estudio
Caso 1	Sin correlación
Caso 2	Correlación A1-A2
Caso 3	Correlación A1-A3
Caso 4	Correlación A1-A4

En la Ilustración 56 se muestra la criticidad (CI), que vemos que para cada actividad su valor permanece constante en todos los casos simulados, es decir, la correlación no tiene impacto sobre la criticidad. En este escenario los valores de la criticidad están más repartidos, lo cual es coherente con el escenario considerado, donde los tres caminos posibles de la red del proyecto, son iguales en condiciones sin incertidumbre. Sin embargo, cabe destacar que la actividad A1, y la A5 son las de mayor índice.

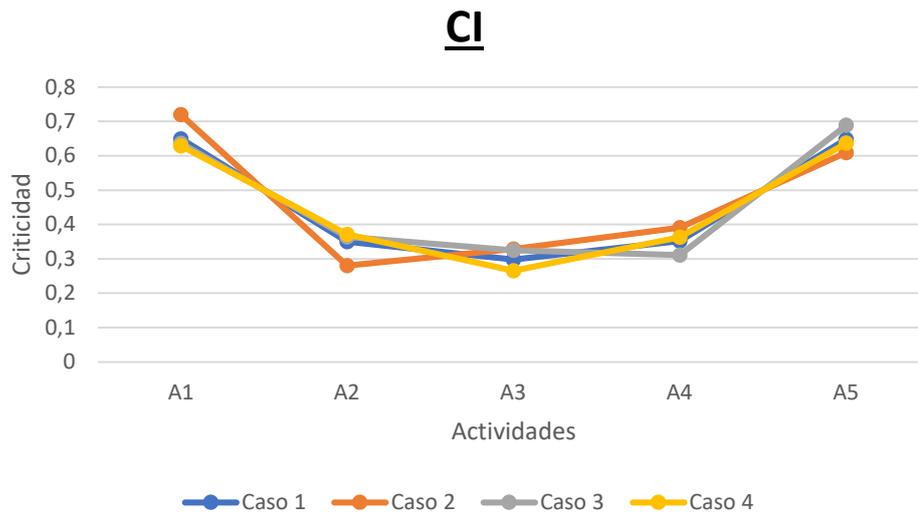


Ilustración 56. Índice de Criticidad. Caminos iguales, distribución normal, correlación positiva. Por otro lado, en la Ilustración 57 se puede apreciar los valores de la crucialidad. Las actividades con mayor crucialidad son la A1 y la A5. Es decir, estas dos actividades son críticas y cruciales. Se aprecia también, que a medida que las actividades se correlacionan con la A1, su índice de crucialidad aumenta con respecto al caso sin correlación (caso 1), y esto se debe a la existencia de correlación positiva entre ellas.

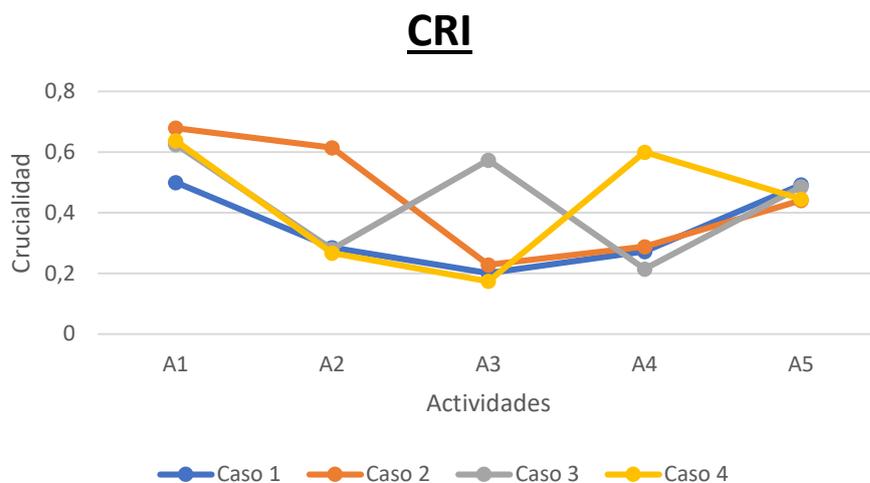


Ilustración 57. Índice de Crucialidad. Caminos iguales, distribución normal, correlación positiva.

Por último, en la Ilustración 58 se representan los valores del SSI. La forma de esta gráfica es muy similar a la del índice de criticidad. Se observa que las actividades con mayor índice son la A1 y A5, lo que confirma que dichas actividades son las más críticas.

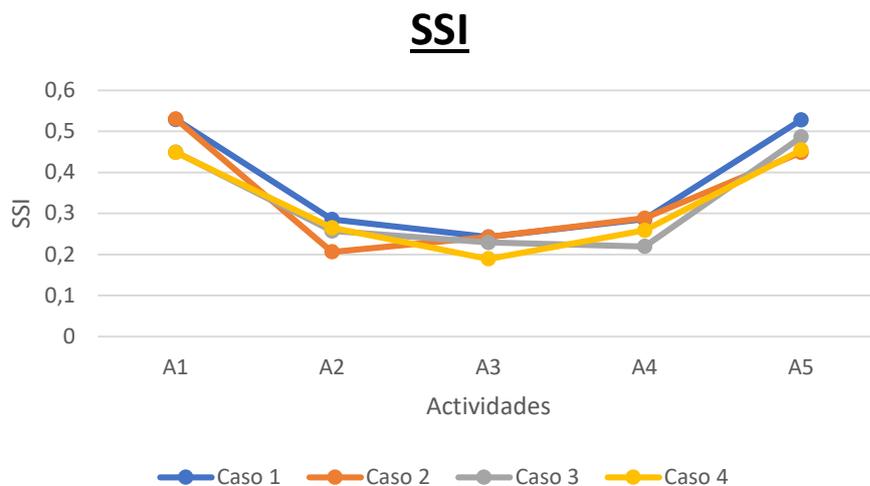


Ilustración 58. SSI. Caminos iguales, distribución normal, correlación positiva.

5.2.1.2 Correlación negativa

A continuación, se presentan los resultados de la simulación de Monte Carlo aplicada al escenario en el cual los tres caminos posibles tienen la misma duración. La correlación tenida en cuenta para estas simulaciones es de 0,8 negativa, entre las actividades A1-A2, A1-A3 y A1-A4.

5.2.1.2.1 Resultados de la simulación

Los resultados de la simulación de Monte Carlo se muestran a continuación en la Ilustración 59, Ilustración 60 e Ilustración 61. En estas ilustraciones se pueden apreciar las funciones de distribución del proyecto para cada uno de los casos estudiados, así como los valores de la duración media y del percentil 95, siendo estos los datos más interesantes para el análisis del impacto de la correlación en el proyecto.

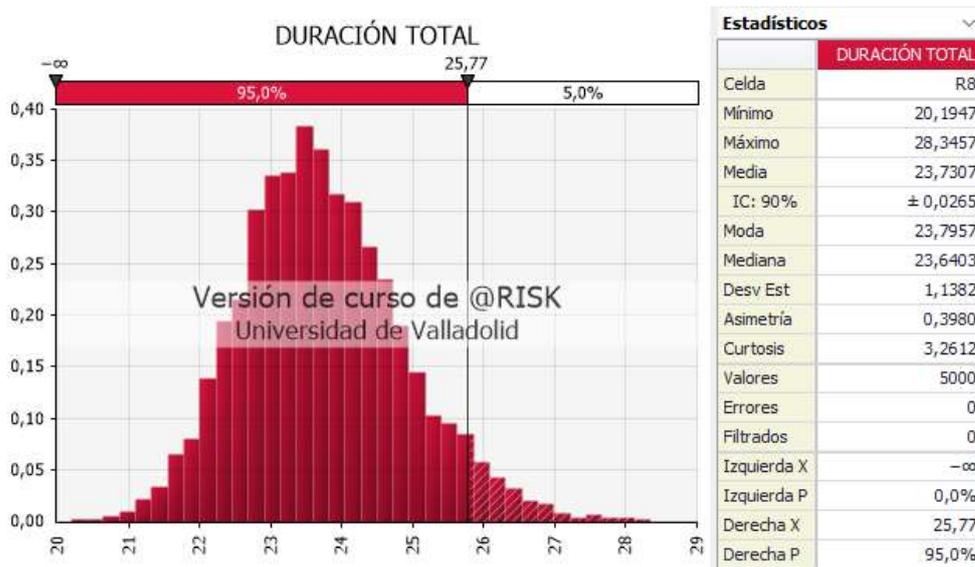


Ilustración 59. Distribución normal. Correlación negativa A1-A2.

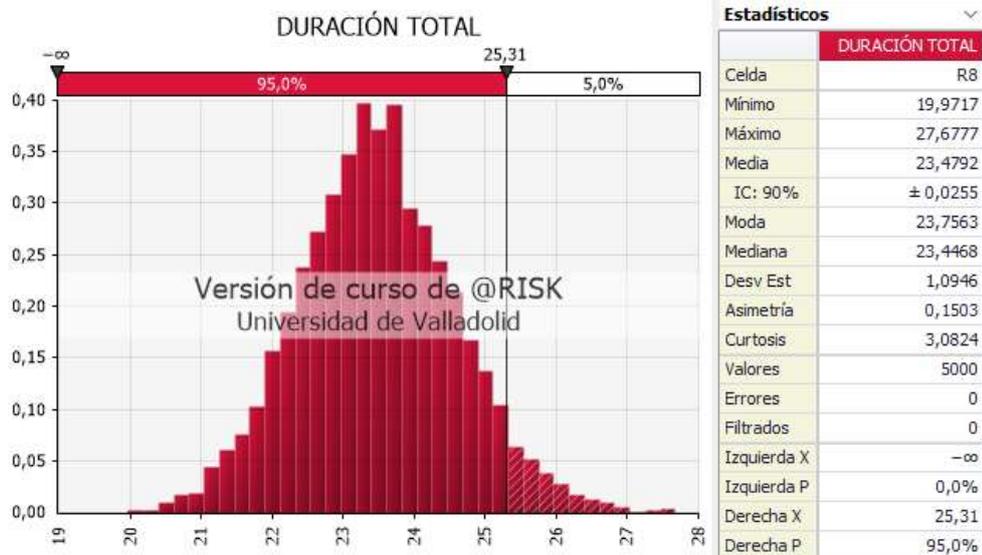


Ilustración 60. Distribución normal. Correlación negativa A1-A3.

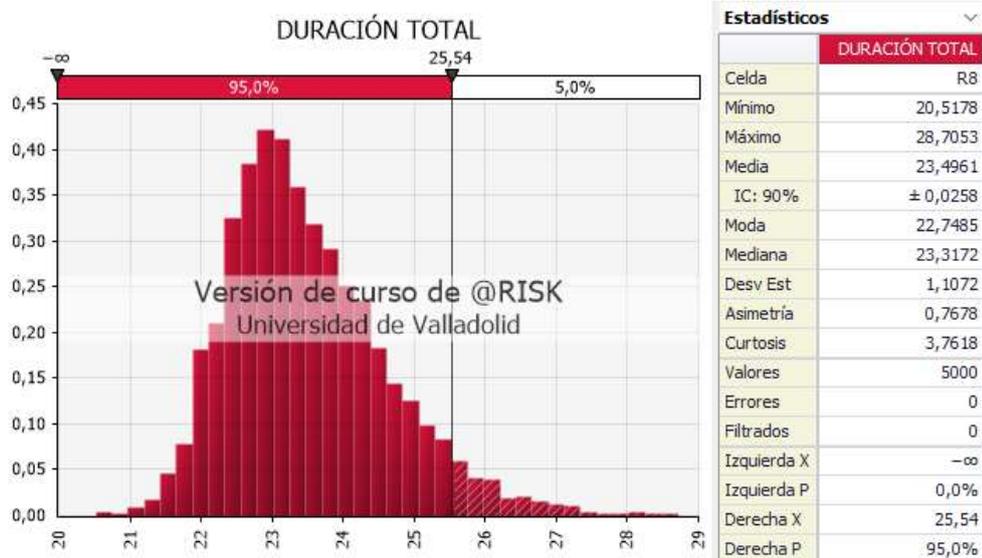


Ilustración 61. Distribución normal. Correlación negativa A1-A4.

5.2.1.2.2 Indicadores de sensibilidad

A continuación, se muestran los valores de los indicadores de sensibilidad estudiados (Índice de Criticidad, Índice de Crucialidad, SSI), en forma de gráfico, lo que permite ver el avance que tienen estos indicadores a lo largo de la simulación en los distintos casos.

En la Ilustración 62 se muestra la criticidad (CI), que vemos que para cada actividad su valor permanece constante en todos los casos simulados, es decir, la correlación no tiene impacto sobre la criticidad. En este escenario los valores de la criticidad están más repartidos, lo cual es coherente con el escenario considerado, donde los tres caminos posibles de la red del proyecto, son iguales en condiciones sin incertidumbre. Sin embargo, cabe destacar que la actividad A1, y la A5 son las de mayor índice.

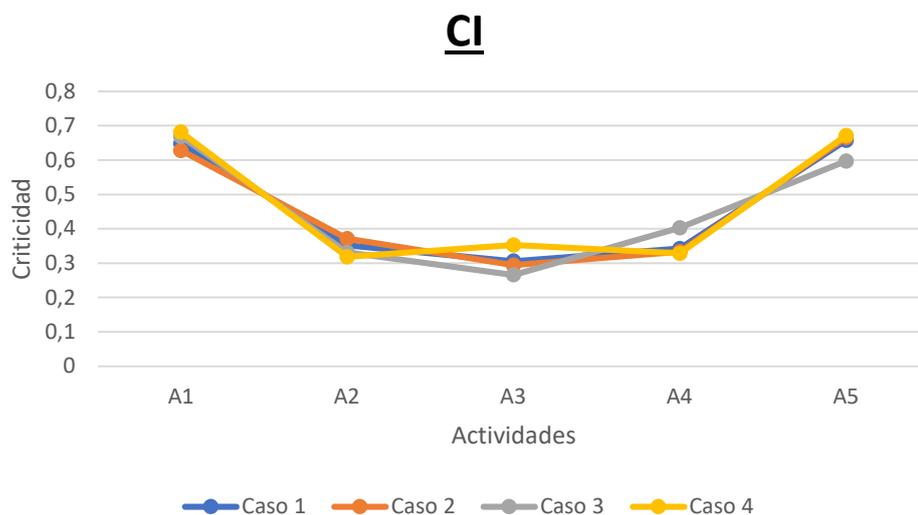


Ilustración 62. Índice de Criticidad. Caminos iguales, distribución normal, correlación negativa.

Por otro lado, en la Ilustración 57 se puede apreciar los valores de la crucialidad. Las actividades con mayor crucialidad son la A1 y la A5. Es decir, estas dos actividades son críticas y cruciales. Se aprecia también, que a medida que las actividades se correlacionan con la A1, su índice de crucialidad disminuye con respecto al caso sin correlación (caso 1), y esto se debe a la existencia de correlación negativa entre ellas.

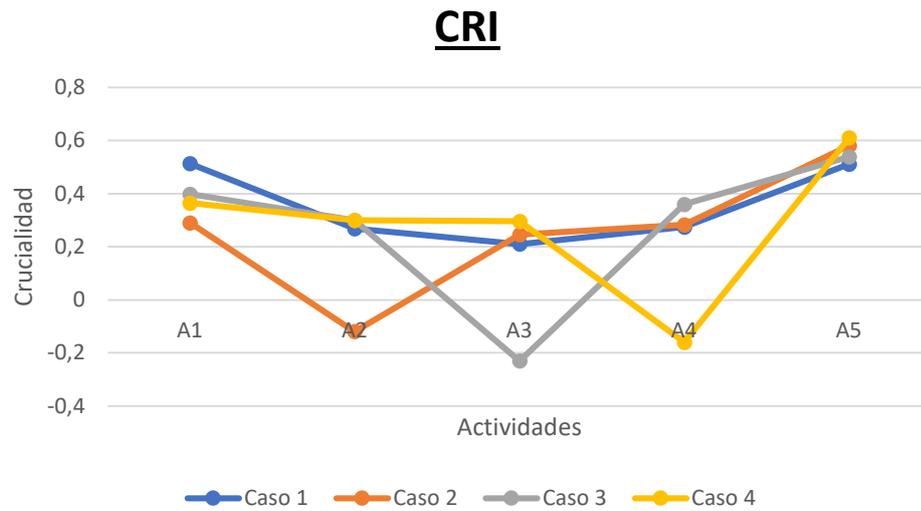


Ilustración 63. Índice de Crucialidad. Caminos iguales, distribución normal, correlación negativa.

Por último, en la Ilustración 64 se representan los valores del SSI. La forma de esta gráfica es muy similar a la del índice de criticidad. Se observa que las actividades con mayor índice son la A1 y A5, lo que confirma que dichas actividades son las más críticas.

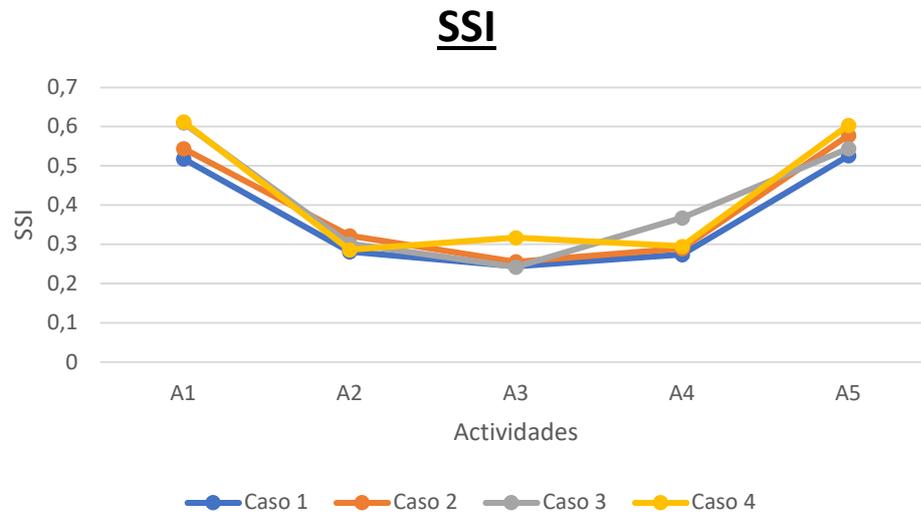


Ilustración 64. SSI. Caminos iguales, distribución normal, correlación negativa.

5.2.2. Distribución triangular

A continuación, se muestran los resultados de la simulación modelando la duración de las actividades del proyecto mediante funciones de distribución triangulares. La red de proyecto sería la mostrada en la Ilustración 65, donde se puede apreciar que los tres caminos posibles son de igual duración, 20,5 unidades de tiempo, en condiciones deterministas.

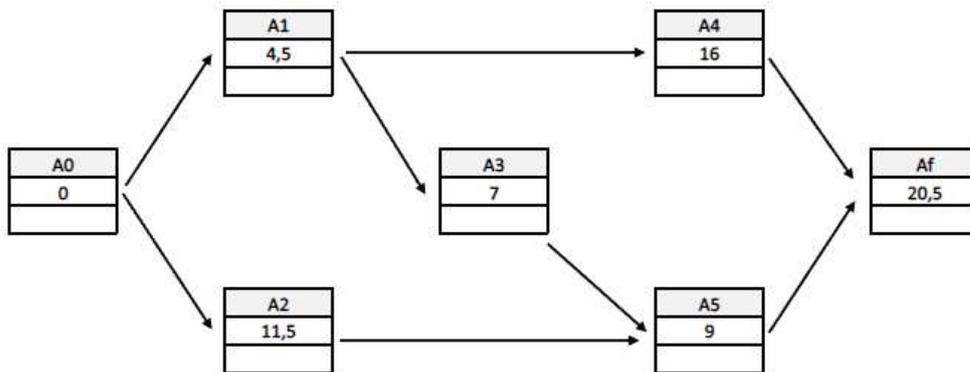


Ilustración 65. Red de proyecto. Caminos iguales- Funciones de distribución triangular.

Para cada iteración de la simulación, se generaron valores aleatorios de las duraciones de las actividades, siguiendo una distribución de probabilidad triangular (no simétrica). Con los datos de la Tabla 9, las funciones de distribución de cada actividad quedan modeladas de la siguiente manera (Ilustración 66).

Nombre	Celda	Función	Gráfico	Mínimo	Máximo	Media	Moda	Mediana	Desv. estándar
A1	L3	RiskTriang(D4;E4;F4;RiskName(B4);RiskStatic(0);RiskCorrmatt(Correlaciones 1;1))		4,0095	7,9562	5,5000	4,5201	5,3539	0,8899
A4	P3	RiskTriang(D7;E7;F7;RiskName(B7);RiskStatic(0);RiskCorrmatt(Correlaciones 1;4))		15,5198	19,4562	17,0000	16,0201	16,8537	0,8899
A3	N8	RiskTriang(D6;E6;F6;RiskName(B6);RiskStatic(0);RiskCorrmatt(Correlaciones 1;3))		6,5141	8,9722	7,5000	7,0062	7,4186	0,5401
A2	L13	RiskTriang(D5;E5;F5;RiskName(B5);RiskStatic(0);RiskCorrmatt(Correlaciones 1;2))		11,0133	16,4303	13,0000	11,5667	12,7918	1,2417
A5	P13	RiskTriang(D8;E8;F8;RiskName(B8);RiskStatic(0);RiskCorrmatt(Correlaciones 1;5))		8,5041	10,9741	9,5000	8,9937	9,4188	0,5401

Ilustración 66. Actividades función distribución triangular. Fuente: @Risk.

Considerando en primer lugar, la ausencia de correlación entre actividades del proyecto, se obtiene la función de distribución mostrada en la Ilustración 67. El percentil 95, en este escenario sin correlación en el que partimos de tres caminos críticos igual de posibles, es de 25,41.

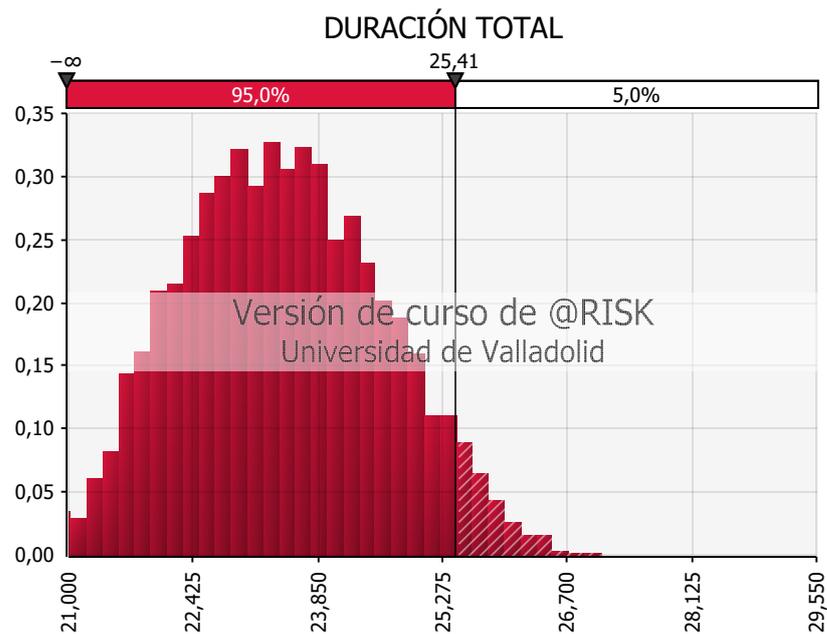


Ilustración 67. Función de distribución proyecto. Caminos iguales, funciones de distribución triangular.
Fuente: @Risk

Los estadísticos se aprecian en la Ilustración 68. La duración media del proyecto, modelando la duración de las actividades mediante funciones de distribución triangulares, y en ausencia de correlación, es de 23,45.

Estadísticos	
	DURACIÓN TOTAL
Celda	R8
Mínimo	20,4722
Máximo	27,0850
Media	23,4456
IC: 90%	± 0,0266
Moda	22,6536
Mediana	23,4054
Desv Est	1,1442
Asimetría	0,1514
Curtosis	2,5003

Ilustración 68. Estadísticos. Caminos iguales, funciones de distribución triangular sin correlación. Fuente: @Risk.

5.2.2.1 Correlación positiva

A continuación, se presentan los resultados de la simulación de Monte Carlo aplicada al escenario en el cual los tres caminos posibles tienen la misma duración. La correlación tenida en cuenta para estas simulaciones es de 0,8 positiva, entre las actividades A1-A2, A1-A3 y A1-A4.

5.2.2.1.1 Resultados de la simulación

Los resultados de la simulación de Monte Carlo se muestran a continuación en la Ilustración 69, Ilustración 70 e Ilustración 71. En estas ilustraciones se pueden apreciar las funciones de distribución del proyecto para cada uno de los casos estudiados, así como los valores de la duración media y del percentil 95, siendo estos los datos más interesantes para el análisis del impacto de la correlación en el proyecto.

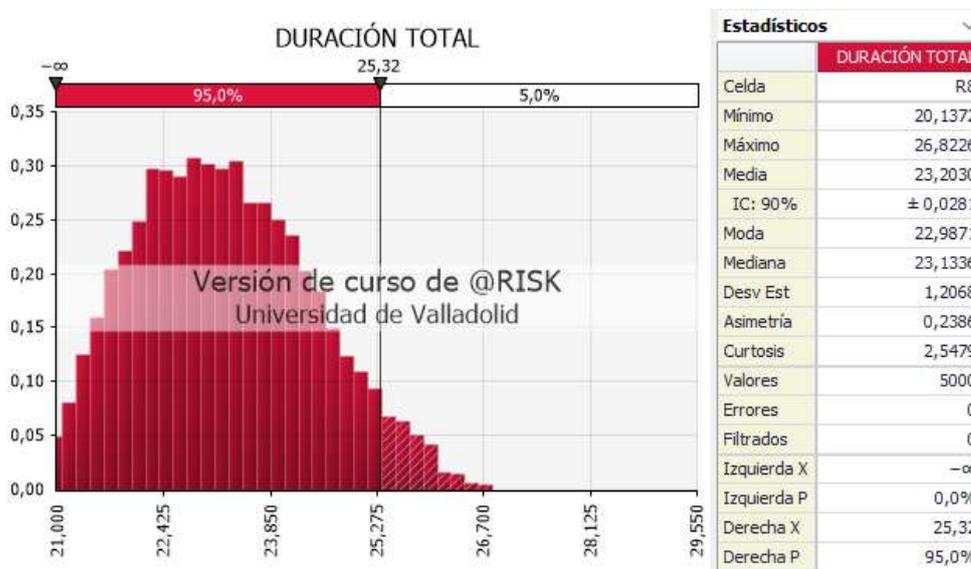


Ilustración 69. Distribución triangular. Correlación positiva A1-A2.

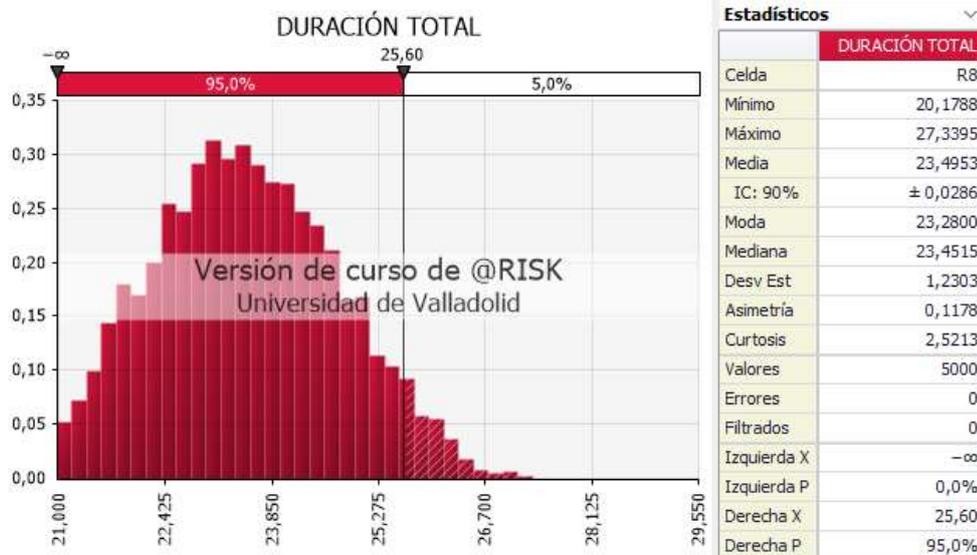


Ilustración 70. Distribución triangular. Correlación positiva A1-A3.

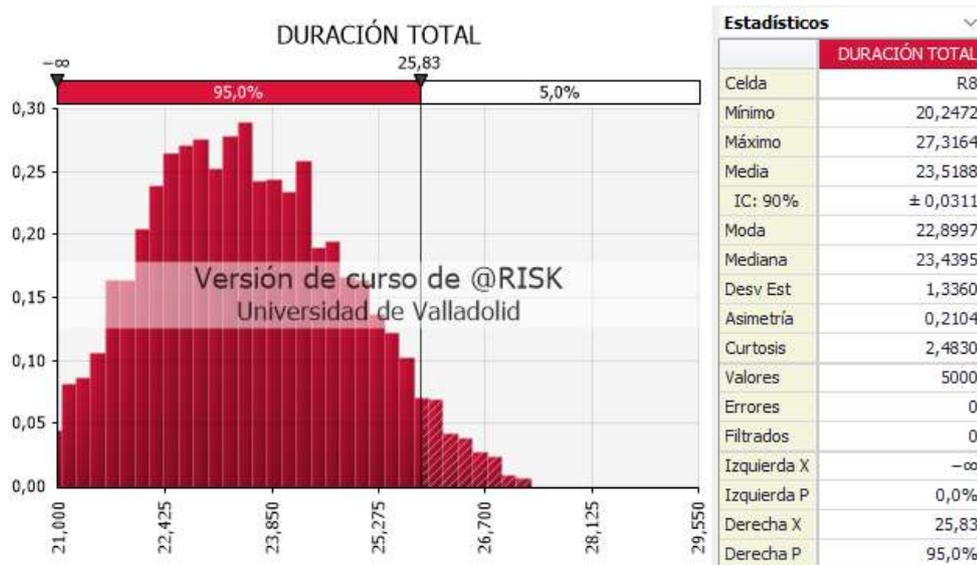


Ilustración 71. Distribución triangular. Correlación positiva A1-A4.

5.2.2.1.2 Indicadores de sensibilidad

A continuación, se muestran los valores de los indicadores de sensibilidad estudiados (Índice de Criticidad, Índice de Crucialidad, SSI), en forma de gráfico, lo que permite ver el avance que tienen estos indicadores a lo largo de la simulación en los distintos casos.

En la Ilustración 72 se muestra la criticidad (CI), que vemos que, para cada actividad, su valor permanece constante en todos los casos simulados, es decir, la correlación no tiene impacto sobre la criticidad. En este escenario, los valores de la criticidad están más repartidos, lo cual es coherente con el escenario considerado, donde los tres caminos posibles de la red del proyecto, son iguales en condiciones sin incertidumbre. Sin embargo, cabe destacar que la actividad A1, y la A5 son las de mayor índice.

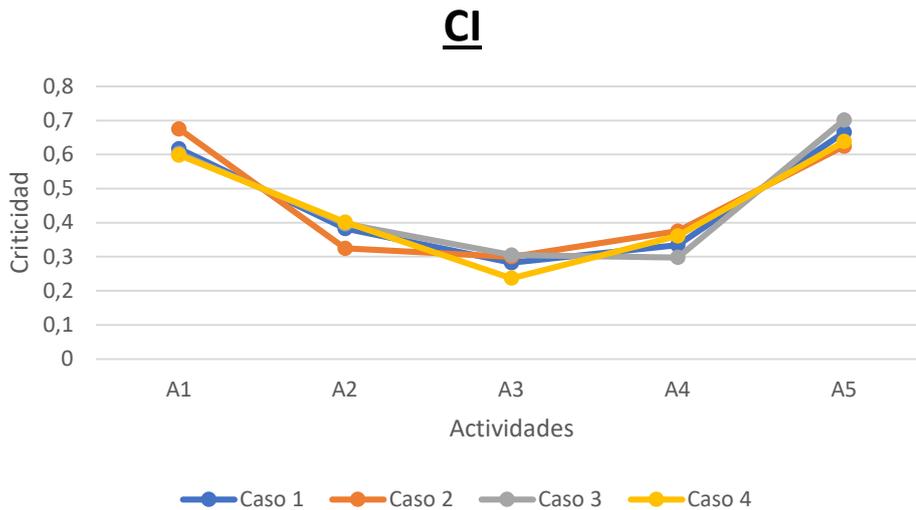


Ilustración 72. Índice de Criticidad. Caminos iguales, distribución triangular, correlación positiva.

Por otro lado, en la Ilustración 73 se puede apreciar los valores de la crucialidad. Las actividades con mayor crucialidad son la A1 y la A5. Es decir, estas dos actividades son críticas y cruciales. Se aprecia también, que a medida que las actividades se correlacionan con la A1, su índice de crucialidad aumenta con respecto al caso sin correlación (caso 1), y esto se debe a la existencia de correlación positiva entre ellas.

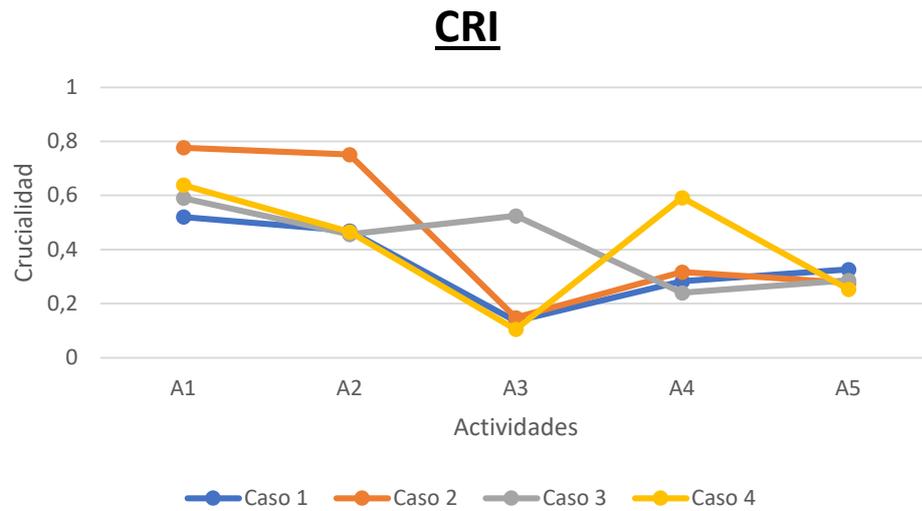


Ilustración 73. Índice de Crucialidad. Caminos iguales, distribución triangular, correlación positiva.

Por último, en la Ilustración 74 se representan los valores del SSI. La forma de esta gráfica es muy similar a la del índice de criticidad. Se observa que las actividades con mayor índice son la A1 y A5, lo que confirma que dichas actividades son las más críticas.

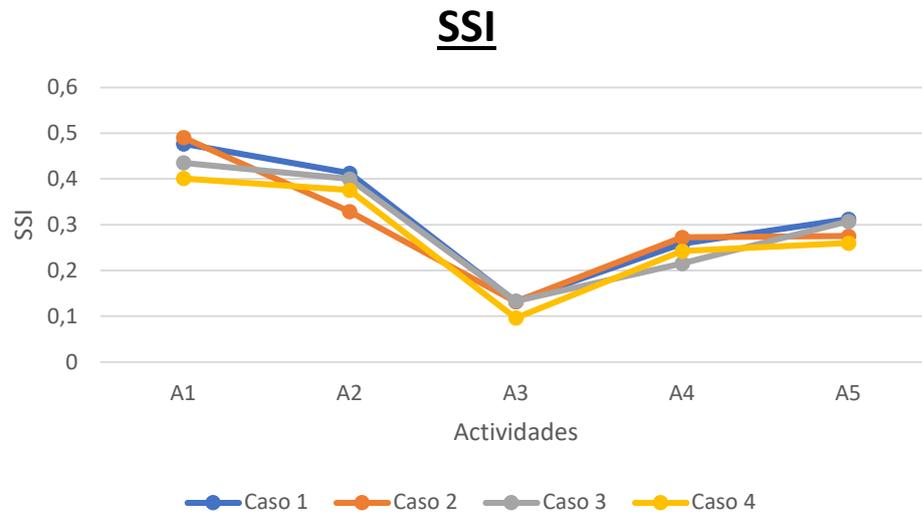


Ilustración 74. SSI. Caminos iguales, distribución triangular, correlación positiva.

5.2.2.2 Correlación negativa

A continuación, se presentan los resultados de la simulación de Monte Carlo aplicada al escenario en el cual los tres caminos posibles tienen la misma duración. La correlación tenida en cuenta para estas simulaciones es de 0,8 negativa, entre las actividades A1-A2, A1-A3 y A1-A4.

5.2.2.2.1 Resultados de la simulación

Los resultados de la simulación de Monte Carlo se muestran a continuación en la Ilustración 75, Ilustración 76 e Ilustración 77. En estas ilustraciones se pueden apreciar las funciones de distribución del proyecto para cada uno de los casos estudiados, así como los valores de la duración media y del percentil 95, siendo estos los datos más interesantes para el análisis del impacto de la correlación en el proyecto.

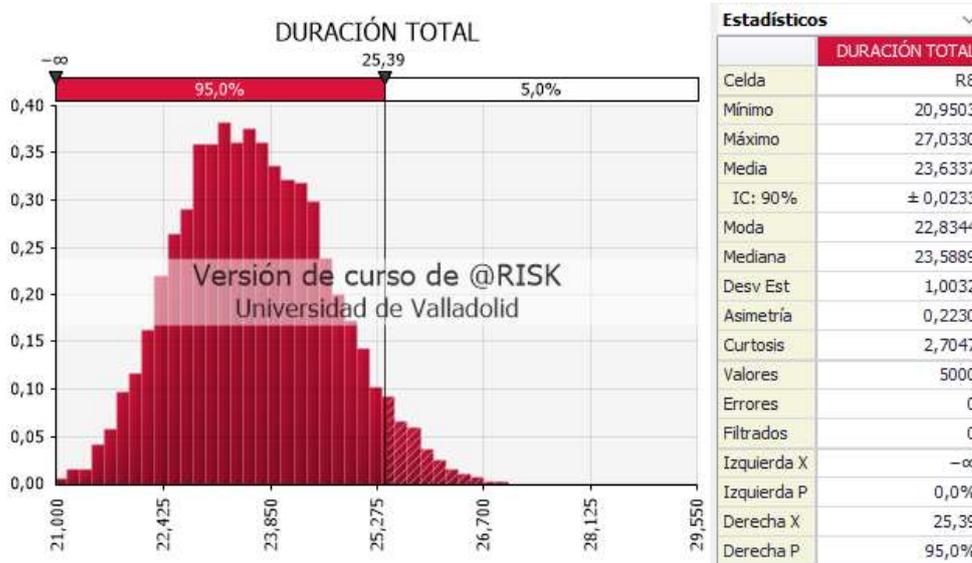


Ilustración 75. Distribución triangular. Correlación negativa A1-A2.

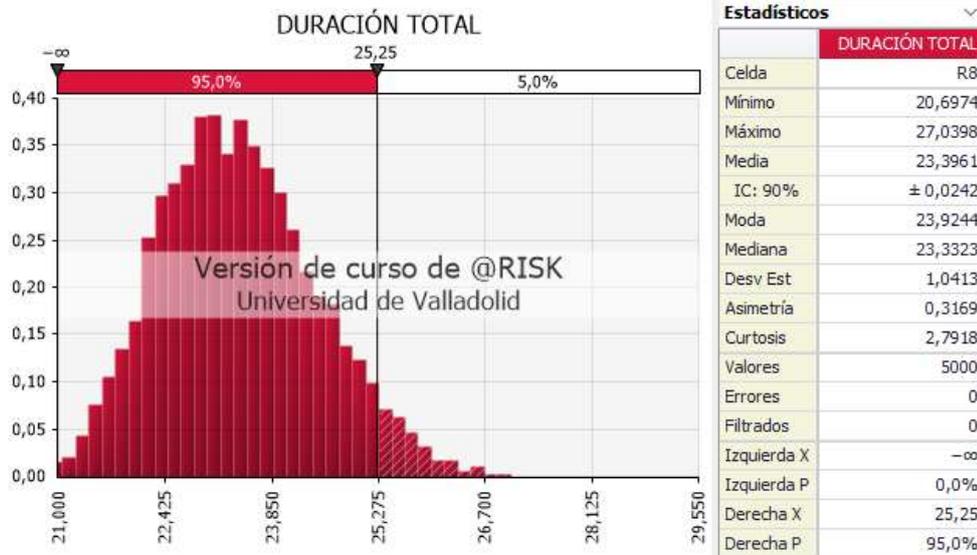


Ilustración 76. Distribución triangular. Correlación negativa A1-A3.

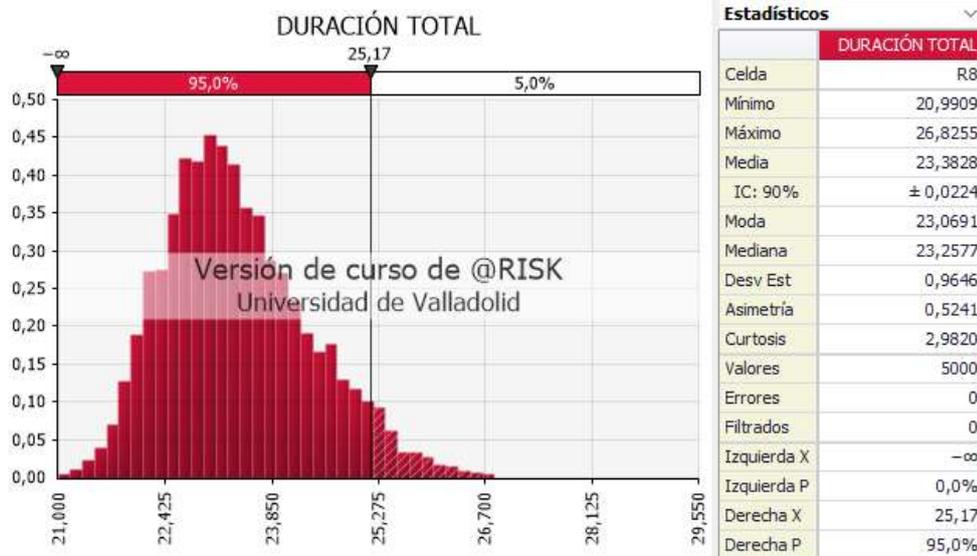


Ilustración 77. Distribución triangular. Correlación negativa A1-A4.

5.2.2.2.2 Indicadores de sensibilidad

A continuación, se muestran los valores de los indicadores de sensibilidad estudiados (Índice de Criticidad, Índice de Crucialidad, SSI), en forma de gráfico, lo que permite ver el avance que tienen estos indicadores a lo largo de la simulación en los distintos casos.

En la Ilustración 78 se muestra la criticidad (CI), que vemos que, para cada actividad, su valor permanece constante en todos los casos simulados, es decir, la correlación no tiene impacto sobre la criticidad. En este escenario, los valores de la criticidad están más repartidos, lo cual es coherente con el escenario considerado, donde los tres caminos posibles de la red del proyecto, son iguales en condiciones sin incertidumbre. Sin embargo, cabe destacar que la actividad A1, y la A5 son las de mayor índice.

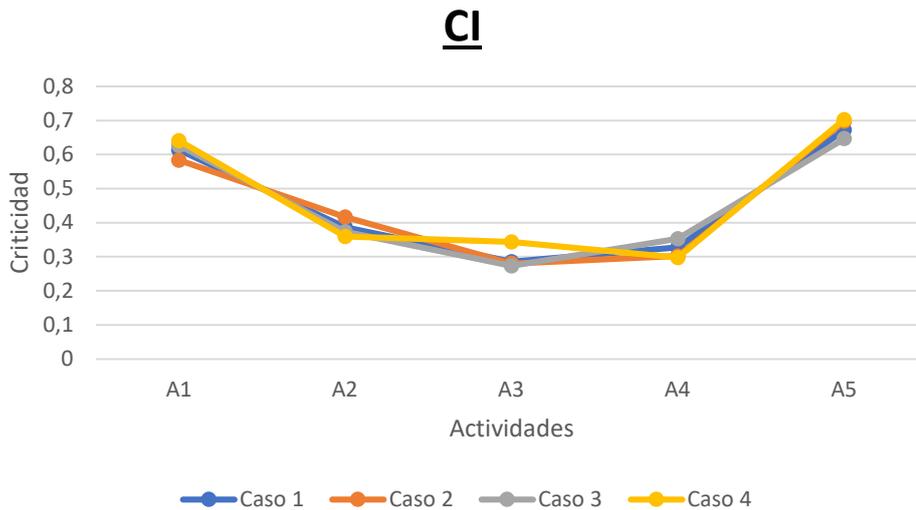


Ilustración 78. Índice de Criticidad. Caminos iguales, distribución triangular, correlación negativa.

Por otro lado, en la Ilustración 79, se puede apreciar los valores de la crucialidad. Las actividades con mayor crucialidad son la A1 y la A2. Se aprecia también, que a medida que las actividades se correlacionan con la A1, su índice de crucialidad disminuye con respecto al caso sin correlación (caso 1), y esto se debe a la existencia de correlación negativa entre ellas.

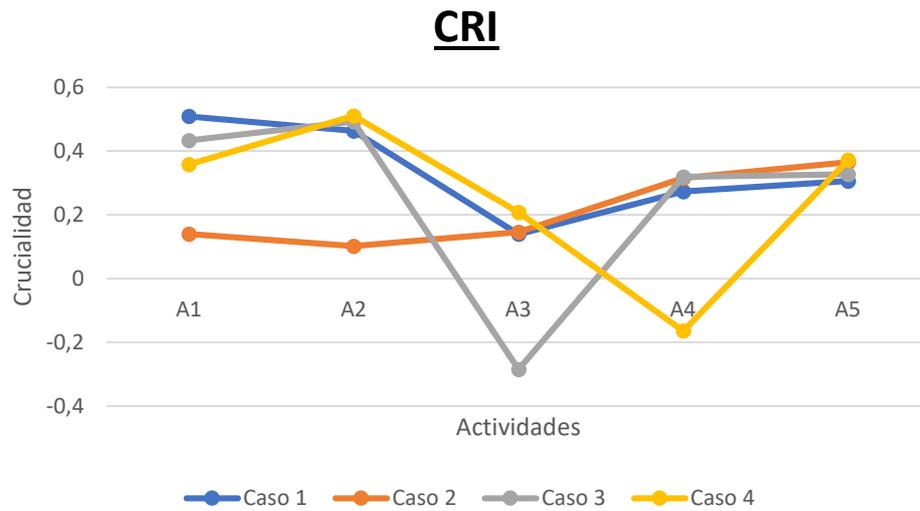


Ilustración 79. Índice de Crucialidad. Caminos iguales, distribución triangular, correlación negativa.

Por último, en la Ilustración 80 se representan los valores del SSI. La forma de esta gráfica es muy similar a la del índice de criticidad. Se observa que las actividades con mayor índice son la A1 y A5, lo que confirma que dichas actividades son las más críticas.

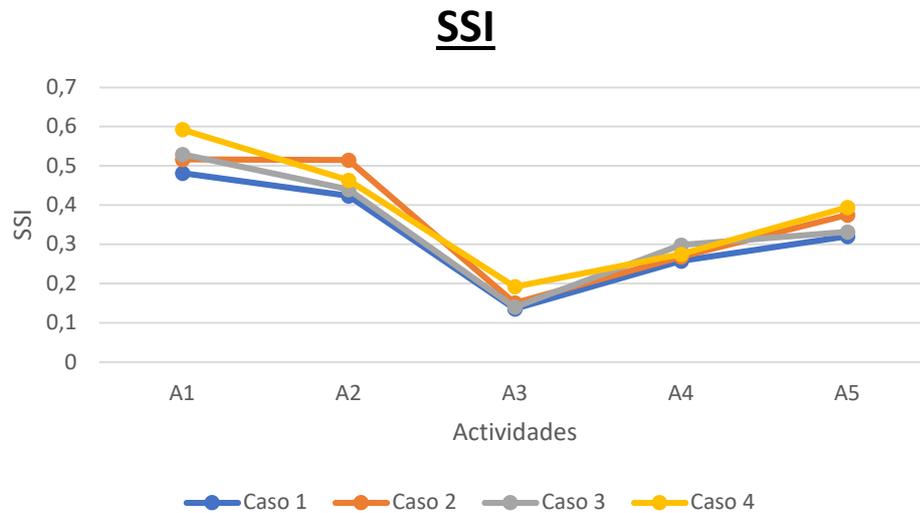


Ilustración 80. SSI. Caminos iguales, distribución triangular, correlación negativa.

5.2.3. Estadísticos

Tras la simulación del segundo escenario contemplado, en el cuál contábamos con los tres caminos posibles de la misma duración, se han obtenido los siguientes estadísticos. Para esta simulación se ha modelado la duración de las actividades del proyecto utilizando funciones de distribución normal y triangular, además de introducir correlación positiva y negativa entre algunas actividades, como se ha mostrado anteriormente.

En primer lugar, la media de la duración total del proyecto para cada uno de los casos, visible en la Ilustración 81. El gráfico contempla la estimación de la duración media del proyecto, considerando las incertidumbres y correlaciones entre actividades, y se aprecia que la duración del proyecto casi no sufre variaciones.

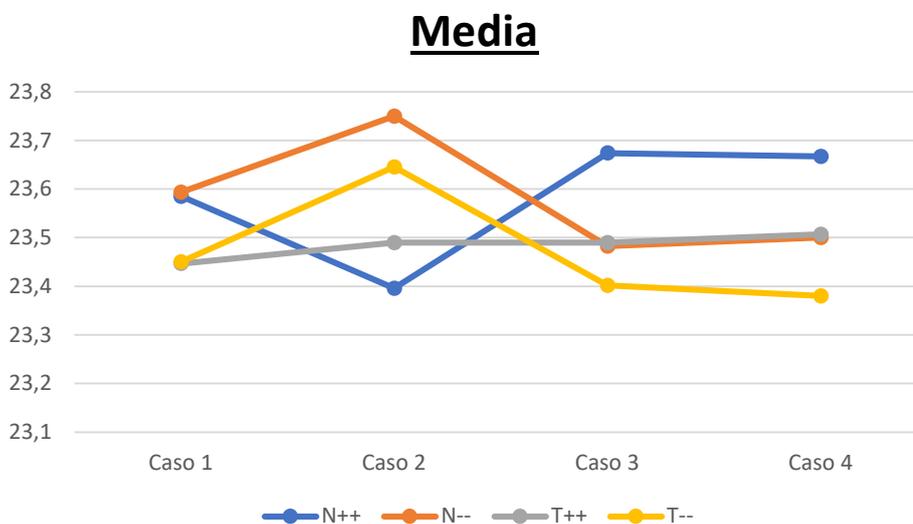


Ilustración 81. Caminos iguales. Media de las simulaciones.

En segundo lugar, el percentil 95 (Ilustración 82), que es un indicador que mide el valor por debajo del cual se observan el 95% de las observaciones. En este contexto, el percentil indica que la duración de los proyectos simulados ha tenido un valor igual o menor el 95% de las simulaciones.

Analizando el gráfico, vemos que los valores del percentil 95 son muy distintos a los obtenidos en el primer escenario en que teníamos un camino crítico dominante. En este escenario los valores del percentil son más dispersos, y se observa que los valores del percentil varían en todos los casos. Este resultado es coherente con el hecho de que no haya un camino dominante, y por tanto cualquier camino pueda ser crítico en función de los valores aleatorios de las duraciones de las actividades de cada uno, eso causa que la correlación entre actividades afecte de manera repartida al valor del percentil 95.

En los casos sin correlación, o con correlación entre A1-A2 que no pertenecen al mismo camino, el percentil no varía. Sin embargo, cuando se correlaciona A1-A3 (caso 3), o A1-A4 (caso 4) que son actividades del mismo camino, el percentil aumenta o disminuye dependiendo del tipo de correlación.

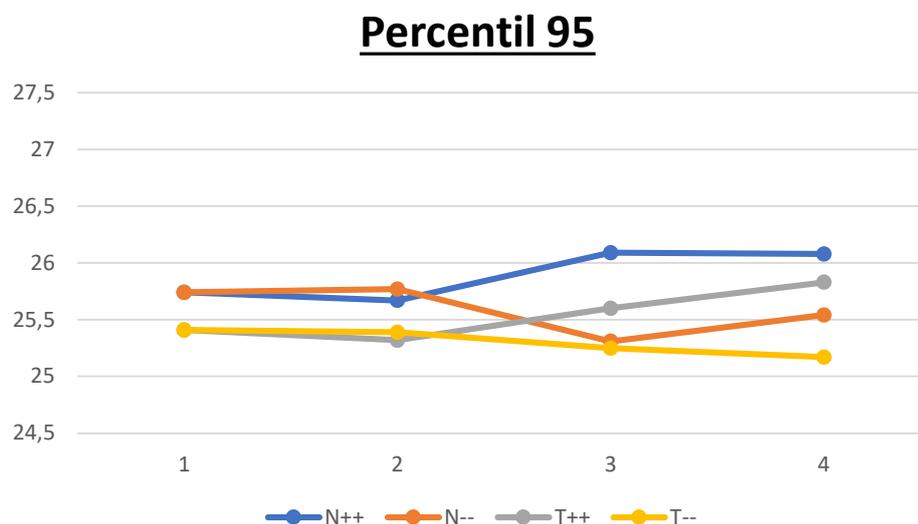


Ilustración 82. Caminos iguales. Percentil 95.

La desviación estándar, sacada en este caso de la duración del proyecto, permite medir cuánto se alejan los datos de la media, es decir, aporta información sobre la variabilidad de la duración del proyecto (Ilustración 83).

De igual forma que con el percentil 95, se aprecia que la correlación positiva entre actividades del mismo camino aumenta la variabilidad, correspondiente con las líneas azul y gris en la Ilustración 83. Por otro lado, la correlación negativa disminuye la variabilidad. Esto permite reafirmar las conclusiones extraídas anteriormente de que la correlación tiene un impacto en la variabilidad de la duración del proyecto.

Desv. Estándar

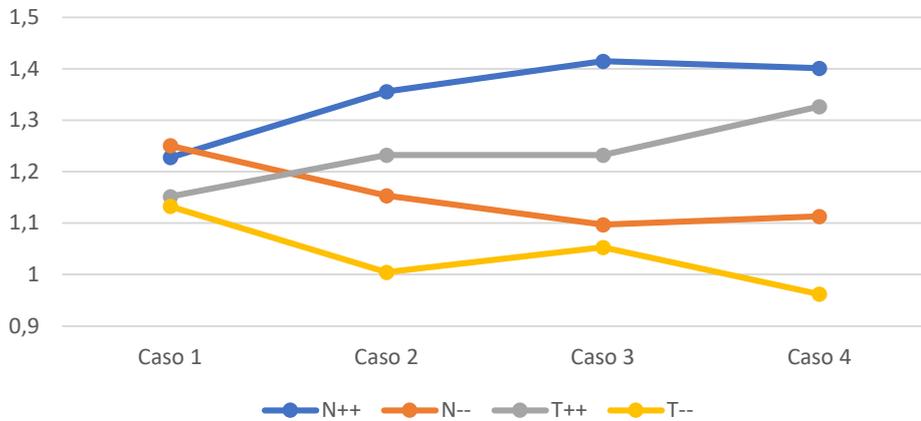


Ilustración 83. Caminos iguales. Desviación estándar de las simulaciones.

Otro estadístico medido es la asimetría, visible en la Ilustración 84. La asimetría es una medida que evalúa la distribución de los datos en relación con su simetría. Un valor de asimetría cercana a cero, como en este caso, indica una distribución aproximadamente simétrica.

Asimetría

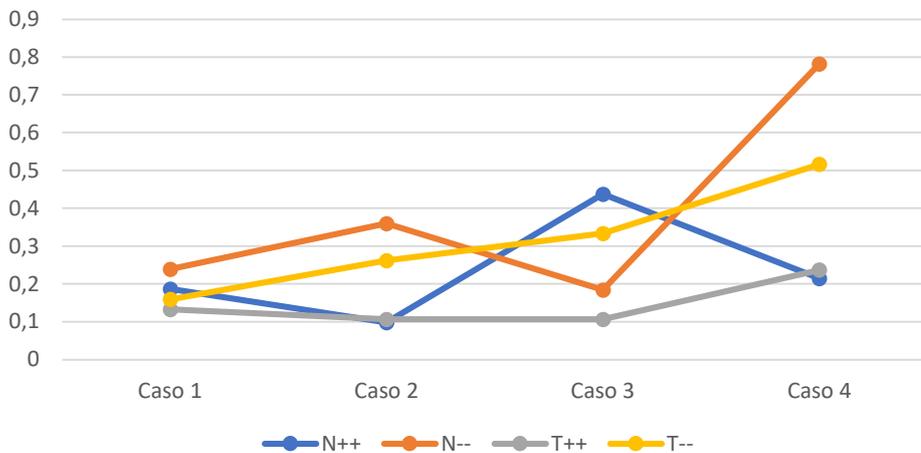


Ilustración 84. Caminos iguales. Asimetría de las simulaciones.

Por último, la curtosis, mostrada en la Ilustración 85, que es una medida que describe la forma de la distribución de los datos en relación con una distribución normal. Una medida de curtosis positiva indica que los valores tienden a concentrarse alrededor de la media.

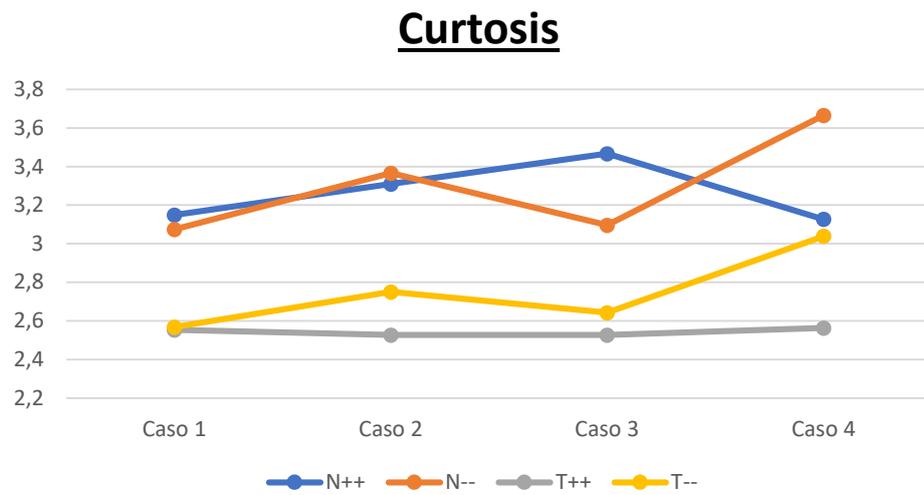


Ilustración 85. Caminos iguales. Curtosis de las simulaciones

Capítulo 6 CONCLUSIONES

Siguiendo con la línea de investigación planteada por el Dr. Javier Pajares, que inicia el estudio del impacto de la correlación entre las actividades del proyecto sobre los indicadores de sensibilidad, en este trabajo se ha ampliado dicho estudio abordando el análisis de la correlación entre actividades y su impacto en la duración de proyectos, utilizando indicadores de sensibilidad y la técnica de simulación de Monte Carlo. El objetivo principal que se fijó al inicio era analizar cómo la consideración de la correlación entre actividades puede influir en los indicadores de sensibilidad y, a su vez, en la duración del proyecto. A lo largo de este trabajo, se han examinado diferentes escenarios y considerado distintas distribuciones de probabilidad para evaluar dicha influencia.

Para lograr dicho objetivo, se diseñaron y ejecutaron varios escenarios de simulación utilizando el método de Monte Carlo. En cada escenario, se modeló la incertidumbre en la duración de las actividades mediante distintas funciones de distribución (normal y triangular), considerando diferentes tipos de correlación (positiva y negativa, de valor 0,8). Estos escenarios permitieron evaluar el impacto de la correlación en los indicadores de sensibilidad y, en última instancia, en la duración global del proyecto.

A lo largo del trabajo, se recopilaron y analizaron los resultados obtenidos en cada escenario, comparando y contrastando los efectos de la correlación en la duración del proyecto. A continuación, se presentan las conclusiones más relevantes obtenidas a partir de este análisis.

Los resultados obtenidos tras la aplicación de simulación de Monte Carlo demuestran que la consideración de la correlación entre actividades en un proyecto puede tener un impacto significativo en los indicadores de sensibilidad y, en consecuencia, en la duración del proyecto.

Independientemente de la función de distribución utilizada, o de las actividades afectadas por la correlación, la duración media del proyecto no se ve afectada. Sin embargo, se observó que los valores de los percentiles, como por ejemplo el percentil 95, varían en función de la correlación. En particular, se identificó que una correlación positiva entre actividades del camino crítico tiende a aumentar el valor del percentil 95, mientras que una correlación negativa tiende a disminuirlo. Esto indica la importancia de considerar la correlación en la planificación de proyectos para una gestión más precisa del riesgo y la incertidumbre.

Además, se ha analizado la relación entre la correlación y los indicadores de sensibilidad, como el Índice de Criticidad, Crucialidad y el SSI. A través de estos análisis, se ha brindado una comprensión más profunda de cómo la correlación puede influir en la importancia relativa de las actividades y en la identificación de las rutas críticas del proyecto.

En relación con el objetivo planteado al inicio de esta investigación, el cual consistía en analizar el impacto de la correlación entre actividades en los indicadores de sensibilidad de la duración del proyecto, se puede afirmar que se ha cumplido.

Aparte de los indicadores de sensibilidad y los percentiles, otro aspecto relevante que ha surgido en este estudio es el uso del *Value at Risk* (VaR). El VaR se utiliza en la gestión de riesgos y finanzas, para evaluar el riesgo de pérdida en una inversión o cartera en un determinado horizonte temporal, con un nivel de confianza específico (Acebes et al., 2021).

En el contexto de este trabajo, el VaR se utiliza para analizar el impacto de las correlaciones entre actividades en el riesgo asociado a la duración del proyecto, ya que proporciona una medida cuantitativa del riesgo asociado a la duración del proyecto en función de las correlaciones entre actividades. Se puede calcular el VaR para diferentes niveles de confianza, por ejemplo 95%, en cada escenario de correlación (positiva y negativa). Se ha encontrado que la correlación entre actividades del camino crítico aumenta el VaR en comparación con escenarios sin correlación, o con correlación entre actividades que no son parte del camino crítico. Esto implica que el riesgo asociado al proyecto varía en función de las correlaciones entre actividades, lo cual puede ser relevante para la toma de decisiones y la gestión del proyecto.

Capítulo 7 BIBLIOGRAFÍA

- Acebes, F., Pajares, F., Galán, J. & López Paredes, A., 2014. Exploring the influence of Seasonal Uncertainty in Project Risk Management.. *Procedia - Social and Behavioral Sciences* 199, pp. 329-338.
- Acebes, F., Pajares, J., González-Varona, J. M. & López-Paredes, A., 2020. Project risk management from the bottom-up: Activity Risk Index.. *Central European Journal of Operations Research*..
- Acebes, F. y otros, 2021. On the project risk baseline: Integrating aleatory uncertainty into project scheduling. *Computers & Industrial Engineering*, Volumen 160.
- Ahmed, M. E.-G. & Issa, R., 2006. Scheduling Risk Analysis in Construction Projects: A Comprehensive Review. *Journal of Construction Engineering and Management*, Volumen 7, pp. 738-750.
- Amat, J., 2016. *Correlación lineal y Regresión lineal simple*. [En línea] Available at: https://www.cienciadedatos.net/documentos/24_correlacion_y_regresion_lineal [Último acceso: Junio 2023].
- Asana, s.f. *Project Risks*. [En línea] Available at: <https://asana.com/es/resources/project-risks> [Último acceso: Mayo 2023].
- Avendaño-Pavez, S. & González-Lizama, E., 2022. Análisis de Correlaciones de Duraciones de Actividades en Proyectos de Túneles.. *Investigación y Desarrollo*, 16.
- Ballesteros-Pérez, P. y otros, 2019. Performance comparison of activity sensitivity metrics in schedule risk analysis. *Automation in Construction*, 106, 102906.
- Ballestín, A. & Leiva, F., 2017. A multicriteria evaluation of project activity sensitivity indices: Theoretical foundations and critical analysis. *International Journal of Project Management*, pp. 395-409.
- Center, P. K., s.f. *Schedule Risk Analysis: How to Measure Your Baseline Schedule's Sensitivity*. [En línea] Available at: https://www.pmknowledgecenter.com/dynamic_scheduling/risk/schedule-risk-analysis-how-measure-your-baseline-schedule%E2%80%99s-sensitivity
- Chapman, C. & Ward, S., 2003. *Project Risk Management: Processes, Techniques, and Insights*. s.l.:s.n.
- Chapman, J. M. & Salkheld, D., 2013. *Project Risk Analysis: Techniques for Forecasting Funding Requirements, Costs, and Timescales*. s.l.:s.n.
- Cho, J. & Yum, B., 1997. An uncertainty importance measure of activities in PERT networks. *International Journal of Production Research*.

- Dvir, D., Raz, T. & Shenhar, A. J., 2003. An empirical analysis of the relationship between project planning and project success.. *International Journal of Project Management*, 21(2), pp. 89-95.
- Formación, M., 2022. *¿Qué es la correlación estadística y cómo interpretarla?*. [En línea] Available at: <https://www.maximaformacion.es/blog-dat/que-es-la-correlacion-estadistica-y-como-interpretarla/>
- Hillson, D. & Murray-Webster, R., 2017. *Understanding and Managing Risk Attitude*. s.l.:Gower Publishing.
- Hortigüela Arozamena, D., 2022. *Programación de proyectos mediante cadena crítica. Dimensionamiento de buffers con simulación de Montecarlo*, Valladolid: s.n.
- Hulett, 1996. Schedule risk analysis simplified. *PM Network*, pp. 22-30.
- Kerzner, H., 2017. *Project Management: A Systems Approach to Planning, Scheduling, and Controlling (12th ed.)*, s.l.: s.n.
- Luna Maldonado, A. & Legaz Pérez, I., 2014. *Experiencia de innovación educativa con "Brainstorming"*, s.l.: s.n.
- Martin, J. J., 1965. Distribution of the Time Through a Directed, Acyclic Network. *Operations Research*, 13(1).
- Minitab, 2015. *A comparison of the Pearson and Spearman correlation methods..* [En línea] Available at: <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/21/help-and-how-to/statistics/basic-statistics/supporting-topics/correlation-and-covariance/a-comparison-of-the-pearson-and-spearman-correlation-methods/> [Último acceso: 2023].
- Orobio, A. & Gomez, H., 2015. *Efectos de la incertidumbre en la programación de proyectos de construcción de carreteras..* Medellín, Colombia: s.n.
- Pajares, J. y otros, 2022. Managing project complexity. Contributions from systems thinking.. *Proceedings from the International Congress on Project Management and Engineering*, pp. 118-129.
- Palisade, s.f. @RISK. [En línea] Available at: <https://www.palisade.com/risk/> [Último acceso: 2023].
- Pinto, J. K., 2015. *Project Management: Achieving Competitive Advantage..* s.l.:Pearson.
- Poza, D. J., 2021. *Tema 5. Gestión del cronograma del proyecto*, Valladolid: s.n.
- Project Management Institute Madrid Spain, s.f. *Gestión de Riesgos*. [En línea] Available at: <https://pmi-mad.org/socios/articulos/2074-articulo-gestion-de-riesgos>
- Project Management Institute, P., 2017. *A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK® Guide)*. s.l.:s.n.
- Robert, C. & Casella, G., 1999. *Monte Carlo Statistical Methods*. s.l.:Springer.

- Superprof, 2022. *Correlación*. [En línea] Available at: <https://www.superprof.es/apuntes/escolar/matematicas/estadistica/disbidimension/correlacion.html>
- TIC, R., 2019. *Estadística Bidimensional: Análisis de Correlación*. [En línea] Available at: http://recursostic.educacion.es/eda/web/eda2007/practicas_profesores/P3/laureano_p3/estadistica_bidimensional/tema2_4.htm
- Triola, M. F., 2009. *Estadística*. s.l.:s.n.
- University, S. N. H., s.f. *La importancia de la gestión de riesgos en proyectos*. [En línea] Available at: <https://es.snhu.edu/noticias/la-importancia-de-la-gestion-de-riesgos-en-proyectos/> [Último acceso: Mayo 2023].
- Van Dorp, J. R. & Duffey, M. R., 1999. Statistical dependence in risk analysis for project networks using Monte Carlo methods.. *International Journal of Production Economics*.
- Vanhoucke, M., 2012. Using activity sensitivity and network topology information to monitor project time performance.. *International Journal of Production Research*.
- Vanhoucke, M., 2013. *Project Management with Dynamic Scheduling Baseline Scheduling, Risk Analysis and Project Control*. s.l.:s.n.
- Vanhoucke, M., 2017. *A Technical Guide to Project Scheduling, Risk and Control*. s.l.:Springer.
- Wang, W. C. & Demsetz, L. A., 2000. Application Example for Evaluating Networks Considering Correlation.. *Journal of Construction Engineering and Management*, 126..
- Wideman, R. M., 2002. *Project and Program Risk Management: A Guide to Managing Project Risks and Opportunities*. s.l.:Project Management Institute.
- Williams, T. M., 1992. Criticality in Stochastic Networks.. *The Journal of the Operational Research Society* 43 (4).
- Williams, T. M., 1993. What is critical?.. *International Journal of Project Management*, 11, pp. 197-200.
- Workmeter, s.f. *Gestión del riesgo: ¿qué es y por qué es importante para las empresas?*. [En línea] Available at: <https://www.workmeter.com/blog/gestion-del-riesgo-que-es-por-que-importante-empresas/> [Último acceso: Mayo 2023].
- Yang, I. T., 2007. Risk modeling of dependence among project task durations.. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 22.
- Yazar, Z., 2002. A qualitative risk analysis and management tool-CRAMM. *SANS InfoSec Reading Room White Paper*, Volumen 11, pp. 12-32.
- Yepes, V., s.f. *Schedule Risk Analysis*. [En línea] Available at: <https://victoryepes.blogs.upv.es/tag/schedule-risk->

