

Simulación Monte Carlo como herramienta para priorizar los riesgos de los proyectos

Monte Carlo simulation for project risk prioritisation

Fernando Acebes Senovilla¹, José Manuel González Varona², Javier Pajares Gutiérrez³, Adolfo López Paredes⁴

Recibido: 24/10/2023 | Aceptado: 25/03/2024

Resumen

En este artículo proponemos un método cuantitativo para priorizar los riesgos identificados en un proyecto. Basado en simulación de Montecarlo, la propuesta que presentamos evita la utilización de la matriz probabilidad – impacto por los problemas que plantea. Para conseguir ordenar por importancia los riesgos identificados en el proyecto, modelamos cada uno de los riesgos según funciones de probabilidad y, aplicando técnicas cuantitativas y simulación de Montecarlo, conseguimos medir el impacto real de cada una de las incertidumbres sobre los objetivos de coste y de duración del proyecto. Demostramos la validez de la metodología utilizando como ejemplo un caso de estudio.

Palabras clave: Matriz de probabilidad-impacto, análisis cuantitativo de riesgos, gestión del riesgo, simulación de Montecarlo, MCSimulRisk.

Abstract.

The risk matrix is a commonly used tool to assess, visualise and analyse risks. It consists of a two-dimensional graphical representation of the probability (“likelihood” or “frequency”) of an outcome occurring and the impact (“severity” or “consequences”) that the outcome would have if it were to occur. Each of the two dimensions of the matrix is further divided into various levels of probability, usually located on the ordinate axis of the matrix, and diverse levels of impact, located on the abscissa axis. The result of each cell, formed by interconnecting a given probability level with the corresponding impact level, is associated with a risk level (urgency, priority, or management action).

The risk matrix (or probability-impact matrix) has been widely implemented as a decision-support tool in both the public and private sectors in areas such as well-integrity risk, drilling hazard management, climatic change responses, or health and safety. Using these matrices to set priorities and guide resource allocation has been established as a recommendation within various international standards and industry guidelines. It is easy to construct and simple to apply compared to other risk assessment methodologies. Also, they provide a clear framework for the systematic review of risks, practically justify risk ranking and prioritisation, and keep stakeholders informed visually and attractively, among other reasons.

Despite this, recent studies have shown that the risk matrix has shortcomings and limitations, making authors question its functionality and accuracy. Taking these limitations into account, in this article, we propose a quantitative method based on Monte Carlo simulation for prioritising the risks of a project, avoiding the use of the probability-impact matrix. To conduct the simulation, we will have the probability and impact data of the risks identified in the project and use ‘MCSimulRisk’ as a simulation tool. We will be able to quantitatively determine the impact of each risk on the cost objective and total duration

¹ Profesor Titular de Universidad (Autor de Correspondencia). GIR INSISOC. Dpto. de Organización de Empresas y CIM. Escuela de Ingenierías Industriales. Universidad de Valladolid. Pº Prado de la Magdalena s/n, 47011 Valladolid (España). Email: fernando.acebes@uva.es ORCID: 0000-0002-4525-2610

² Profesor Contratado Doctor. GIR INSISOC. Dpto. Economía y Administración de Empresas. Universidad de Málaga. Avda. Cervantes, 2. 29071 Málaga (España). Email: jmgonzalezva@uma.es ORCID: 0000-0003-2231-4572

³ Catedrático de Universidad. GIR INSISOC. Dpto. de Organización de Empresas y CIM. Escuela de Ingenierías Industriales. Universidad de Valladolid. Pº Prado de la Magdalena s/n, 47011 Valladolid (España). Email: Javier.pajares@uva.es ORCID: 0000-0002-4748-2946

⁴ Catedrático de Universidad. GIR INSISOC. Dpto. Economía y Administración de Empresas. Universidad de Málaga. Avda. Cervantes, 2. 29071 Málaga (España). Email: loppar@uma.es ORCID: 0000-0001-5748-8308

of the project. The magnitude of the resulting impact will allow us to determine a quantitative prioritisation of the risks identified in the project.

On the other hand, after estimating the probability and impact of the project's risks, we have connected the qualitative risk analysis with the quantitative analysis by quantitatively prioritising the identified risks. In addition, we have managed to quantify the impact of each risk on the cost and duration objectives. We observed existing risks that significantly impact the project's cost, even though they were initially identified for their impact on the project duration.

As a result of applying the proposed method, we obtain a list of prioritised risks according to their impact on the duration objective and another list, different from the previous one, with the prioritised risks on the impact on the project's cost. The order is different; thus, we can discriminate on which risk to act according to which is the most crucial objective in our project and the impact each risk has on the project.

Keywords: Probability-impact matrix, quantitative risk analysis, risk management, Monte Carlo simulation, MCSimulRisk.

1. Introducción

Entre las distintas definiciones de “Proyecto” que podemos encontrar en la literatura, resaltamos la propuesta por European Commission (2018), que lo define como “*una estructura organizacional temporal que se emplea para crear un producto o servicio únicos con ciertas restricciones como tiempo, coste y calidad*”. Debido al carácter único de los proyectos, los riesgos son una parte inseparable de todos ellos, y una adecuada gestión de riesgos debe ser uno de los principales requisitos que todo proyecto debe incorporar (Naderpour et al., 2019).

Es bien sabido que los proyectos en todo el mundo siguen luchando por cumplir sus objetivos, y que alcanzarlos, es una tarea que presenta dificultades (The Standish Group, 2022). En el transcurso de la ejecución de un proyecto, suelen surgir circunstancias imprevistas que alteran los planes y los presupuestos, lo que a menudo resulta en costos adicionales significativos. La gestión de riesgos se reconoce ampliamente como una disciplina esencial para abordar esta incertidumbre en los proyectos. El propósito de la gestión de riesgos en un proyecto consiste en identificar y comunicar el perfil de riesgo de este, con el fin de facilitar a los responsables de la toma de decisiones la implementación de medidas para reducir el impacto de los riesgos en los objetivos del proyecto, incluyendo el presupuesto y el cronograma (Cremers et al., 2014).

Son varias las metodologías y estándares que incluyen un proceso específico para la gestión del riesgo de los proyectos (Simon et al., 1997; International Project Management Association, 2015; Axelos, 2017; Project Management Institute, 2017; European Commission, 2018) incluso, existen normas y guías específicas para ello (International Organization for Standardization, 2018; Project Management Institute, 2019, 2009). A pesar de las diferencias que puedan existir en la denominación de cada una de las fases o procesos que forman parte del proceso de gestión del riesgo, todos ellos integran la identificación del riesgo, evaluación

del riesgo, planificación de una respuesta al riesgo y la implementación de dichas respuestas. Además de los anteriores, se incluye un proceso de seguimiento y control del riesgo. El proceso de “Evaluación del Riesgo” incluye, a su vez, la evaluación del riesgo por métodos cualitativos, así como la evaluación cuantitativa de los riesgos.

Un problema habitual en los procesos de gestión de riesgos de los proyectos es la necesidad de determinar la importancia relativa de las distintas fuentes de riesgo para orientar los esfuerzos posteriores de gestión de riesgos y garantizar que el proyecto siga siendo rentable. Para muchos gestores ocupados con múltiples problemas, una de las tareas más difíciles es decidir en qué asuntos trabajar primero (Ward, 1999) o, dicho de otra manera, qué riesgos son aquellos a los que tienen que prestar más atención para evitar desviaciones de los objetivos del proyecto.

Dado el gran número de fuentes de riesgo y la imposibilidad de abordarlos todos de manera exhaustiva, es natural establecer un orden de prioridad entre los riesgos identificados. Este proceso puede resultar desafiante, ya que determinar de antemano cuáles son los factores más significativos y cuántos de los riesgos merecen un seguimiento detallado individualmente puede ser complicado. Cualquier enfoque que facilite esta tarea de priorización, más aún si es simple, será bien recibida por aquellos dispuestos a utilizarlo (Ward, 1999).

En este sentido, aparecen las matrices de riesgo como herramientas consolidadas y comunes para evaluar y clasificar los riesgos en muchos ámbitos y sectores industriales (Krisper, 2021; Li et al., 2018; Monat and Doremus, 2020; Qazi et al., 2021; Qazi and Simsekler, 2021). Se han vuelto tan comunes que todo el mundo las acepta y las utiliza sin cuestionarlas, con sus ventajas y sus inconvenientes. Las matrices de riesgo utilizan la probabilidad y el impacto potencial de los riesgos para fundamentar la toma de decisiones en torno a la priorización de los riesgos identificados (Proto et al., 2023).

No obstante, la matriz de probabilidad-impacto presenta serias limitaciones (Ball and Watt, 2013; Cox, 2008;

Cox et al., 2005; Duijm, 2015; Goerlandt and Reniers, 2016; Levine, 2012; Vatanpour et al., 2015). La crítica principal dirigida a esta metodología radica en su falta de consideración de las complejas interrelaciones entre diversos riesgos, así como en el empleo de estimaciones precisas para los niveles de probabilidad e impacto. Asimismo, se argumenta que, al asignar los riesgos a una matriz, estos pueden influir en un objetivo particular, lo que dificulta la integración del impacto de los riesgos en múltiples objetivos del proyecto, que a menudo pueden entrar en conflicto. Cox (2008) ha demostrado que las matrices de riesgo tienen graves problemas que podrían reducir su utilidad hasta el punto de hacerlas incluso peores que el azar. Desde entonces, cada vez más académicos y profesionales han sido reacios a la utilización de las matrices de riesgo (Qazi et al., 2021).

Motivados por los inconvenientes que plantea la utilización de las matrices de riesgo, o matriz de probabilidad-impacto, en este trabajo, proponemos una metodología basada en la Simulación de Montecarlo, que permite priorizar los riesgos del proyecto realizando una valoración cuantitativa de estos. Con la ayuda del software de simulación “MCSi-mulRisk” (Acebes et al., 2023a, 2023b), determinaremos cuál es el impacto que produce cada uno de los riesgos en los objetivos de duración (cuantificado en unidades de tiempo) y en los objetivos de coste del proyecto (cuantificado en unidades monetarias). De esta manera, con el resultado del impacto de cada uno de los riesgos, estableceremos una priorización de estos, en base a su importancia absoluta (y no relativa) sobre los objetivos del proyecto. Obtendremos resultados cuantificados, independientes para cada riesgo y para los objetivos de duración, así como para el objetivo de coste del proyecto.

Con esta metodología conseguimos, además, dar cohesión y sentido al proceso “Evaluación del Riesgo” que forma parte del proceso general de Gestión de los Riesgos, y que se divide en dos subprocesos: análisis cualitativo y análisis cuantitativo de riesgos (Project Management Institute, 2017). Hasta donde conocemos sobre la literatura, no se han encontrado referencias que utilicen los datos obtenidos en el análisis cualitativo (datos relativos a la probabilidad e impacto de cada uno de los riesgos identificados) para realizar un análisis cuantitativo de riesgos, integrado dentro del modelo de proyecto. Únicamente hemos observado una línea de investigación a cargo de A. Qazi (Qazi et al., 2021; Qazi and Dikmen, 2021; Qazi and Simsekler, 2021) donde, los autores, proponen un indicador de riesgo con el que determinan el nivel de cada uno de los riesgos identificados respecto del umbral establecido. De forma análoga, Krisper (2021) utiliza los datos cualitativos de los factores de riesgo para construir funciones de probabilidad, pero vuelve a caer en el error de calcular el valor esperado del riesgo para la priorización de los riesgos. Por el contrario, la novedad propuesta en este estudio es la incorporación

al modelo de simulación del proyecto de todos los riesgos identificados, caracterizados por sus valores de probabilidad e impacto, junto con el conjunto de actividades que componen el proyecto.

A partir de aquí, y para conseguir nuestro propósito, el artículo se organiza de la siguiente manera. En la sección 2 se presenta un pequeño resumen sobre la literatura relevante y relacionada con la investigación. En la Sección 3 presentaremos la metodología propuesta. Utilizaremos un caso de estudio en la Sección 4, donde mostraremos cómo aplicar la metodología propuesta. A continuación, discutiremos los resultados obtenidos y, finalmente, en la Sección 5 exponremos nuestras conclusiones sobre la propuesta planteada y las futuras líneas de investigación que pueden desarrollarse a partir de la misma.

2. Revisión de la literatura

En esta sección se presenta la revisión bibliográfica relacionada con los procesos de gestión del riesgo, así como con las matrices de probabilidad-impacto, y se explica qué lugar ocupa el presente estudio en la investigación existente. Esta revisión nos permitirá establecer el contexto en el que se sitúa nuestra propuesta dentro de los procesos integrados de gestión del riesgo. Por otra parte, es necesario conocer las razones que motivan buscar alternativas a las habituales y conocidas matrices de riesgo.

2.1. Metodologías y Estándares en Gestión del Riesgo

Es interesante comenzar con la definición de “Riesgo”, pues es un término que no está universalmente consensuado, incluso ni por los distintos estándares y normas. Así, por ejemplo, International Organization for Standardization (2018) lo define como “*el efecto de la incertidumbre sobre los objetivos*”, mientras que Project Management Institute (2017) lo define como “*un evento o condición incierta que, de producirse, tiene un efecto positivo o negativo sobre uno o más objetivos del proyecto*”. En este trabajo, adoptamos la definición de riesgo propuesta por Hillson (2014) quien utiliza un concepto particular: “*riesgo es la incertidumbre que importa*”. Importa, porque afecta a los objetivos del proyecto; y, únicamente las incertidumbres que tienen un impacto sobre el proyecto serán consideradas “riesgo”.

Así como otros autores (Elms, 2004; Frank, 1999) identifican dos categorías de incertidumbre, la aleatoria, que se caracteriza por la variabilidad y la presencia de un amplio rango de valores posibles, y la epistémica, que surge debido a la ambigüedad o la falta de conocimiento completo, Hillson (2014) clasifica las incertidumbres en cuatro tipos distintos: aleatoria, debida a la variabilidad de las actividades,

estocástica, reconocida como evento de riesgo o posible evento futuro, epistémica, debida igualmente a la ambigüedad, y la ontológica, aquella que desconocemos (cisne negro). Con excepción de la incertidumbre ontológica, que no puede modelarse por desconocimiento absoluto de dicho riesgo, el resto de las incertidumbres identificadas serán incorporadas a nuestro modelo de proyecto. Para ello, se modelarán la probabilidad e impacto de cada incertidumbre como funciones de distribución para incorporarlas a la simulación de Montecarlo.

Por otra parte, existe un proceso de gestión de los riesgos que implica el análisis de oportunidades y amenazas que podrían impactar en los objetivos del proyecto, seguido de la planificación de acciones adecuadas para cada uno de ellos. El objetivo de este proceso es aumentar al máximo la probabilidad de que ocurran oportunidades y reducir al mínimo la probabilidad de que se materialicen las amenazas detectadas.

Si bien es cierto que distintos autores han propuesto su forma particular de entender la gestión de los riesgos de los proyectos (Chapman, 1997; Chapman and Ward, 2003; Hillson and Simon, 2020; Kerzner, 2022), queremos fijarnos en las principales metodologías, normas y estándares en gestión de proyectos utilizadas por académicos y profesionales, para observar cómo tratan la gestión del riesgo (Axelos, 2017; European Commission, 2018; International Organization for Standardization, 2018; International Project Management Association, 2015; Project Management Institute, 2017) (Tabla 1).

En Tabla 1 reflejamos los principales subprocesos que componen el proceso general de gestión del riesgo, desde el punto de vista de cada uno de los diferentes enfoques. Podemos observar que todos los enfoques mencionados contienen un subproceso relativo a la evaluación del riesgo. Alguno de estos enfoques desarrolla el subproceso, dividiéndolo en dos partes: evaluación cualitativa y evaluación cuantitativa. La evaluación cualitativa se refiere al procedimiento de jerarquización de los riesgos individuales del proyecto con el propósito de someterlos a análisis o medidas posteriores. Esto se logra mediante la evaluación de la probabilidad de que ocurran y su posible impacto. Por otro lado, la evaluación cuantitativa corresponde al proceso de realizar un análisis numérico del efecto conjunto de los riesgos individuales identificados y otras fuentes de incertidumbre sobre los objetivos generales del proyecto (Project Management Institute, 2017). A su vez, todos estos enfoques proponen como técnica o herramienta para priorizar los riesgos del proyecto, la matriz de probabilidad-impacto o matriz de riesgo.

En el marco de nuestro estudio, llevaremos a cabo una jerarquización de los riesgos utilizando un enfoque cuantitativo, en contraposición a la valoración cualitativa proporcionada por la matriz de riesgo. Para ello, utilizaremos estimaciones de la probabilidad y el impacto asociados a cada uno de los riesgos identificados. Estas estimaciones serán incorporadas al modelo del proyecto con el propósito de determinar el valor absoluto del impacto de cada riesgo en relación con los objetivos de plazo y coste.

Tabla 1. Procesos de la Gestión del Riesgo. Normas, estándares y metodologías.

	Gestión	Identificación	Evaluación	Planificación Respuesta	Implement. Respuesta	Seguimiento Y Control
ISO 31000	1. Comunicación y consulta	3.1. Identificación del riesgo	3.2. Análisis del riesgo	4. Tratamiento del riesgo		5. Seguimiento y revisión
	2. Alcance, contexto, criterios		3.3. Valoración del riesgo			6. Registro e informe
PMBok	1. Planificar la gestión de los riesgos	2. Identificar los riesgos	3. Análisis cualitativo de los riesgos	5. Planificar la respuesta a los riesgos	6. Implementar la respuesta a los riesgos	7. Monitorear
			4. Análisis cuantitativo de los riesgos			
Prince2	1.1. Identificar el contexto	1.2. Identificar los riesgos	2.1. Estimación del riesgo 2.2. Evaluación del riesgo	3. Planificar la respuesta a los riesgos	4. Implementar respuesta a los riesgos	5. Comunicar
PM²		1. Identificar los riesgos	2. Evaluar riesgos	3. Desarrollar respuesta a los riesgos		4. Control de los riesgos
ICB 4.0	1. Marco de gestión de riesgos	2. Identificar oportunidades y amenazas	3. Evaluar riesgos	4. Seleccionar la respuesta a los riesgos		5. Controlar

2.2 Matriz de probabilidad – impacto

La matriz de riesgo, o matriz de probabilidad-impacto, es una herramienta que se incluye dentro del análisis cualitativo para la gestión del riesgo y que se utiliza para analizar, visualizar y priorizar riesgos, con el objetivo de tomar decisiones sobre los recursos que deben emplearse para combatirlos (Duijm, 2015; Goerlandt and Reniers, 2016). Su uso está ampliamente establecido en distintos sectores, desde la industria de la construcción (Qazi et al., 2021), industria del gas y petróleo (Thomas et al., 2014), sector sanitario (Lemmens et al., 2022), proyectos de ingeniería (Koulinas et al., 2021) y, por supuesto, en dirección de proyectos (International Organization for Standardization, 2019; Li et al., 2018).

La matriz de riesgo representa en una tabla las categorías de probabilidad (normalmente en el eje vertical de la tabla) e impacto (normalmente en el eje horizontal) (Ale et al., 2015). Cada uno de estos ejes está dividido, a su vez, en distintos niveles, de tal manera que podemos encontrar matrices de riesgo de 3x3 niveles, con 3 niveles establecidos para probabilidad y otros 3 niveles para definir el impacto, 5x5, o incluso más niveles (Cox, 2008; Duijm, 2015; Levine, 2012). La matriz clasifica los riesgos en diferentes categorías de riesgo, generalmente etiquetadas con indicadores cualitativos de gravedad (a menudo colores como "Rojo", "Amarillo" y "Verde"). Esta clasificación se realiza combinando cada nivel de probabilidad con cada nivel de impacto de la matriz (Figura 1).

Se distinguen tres tipologías de matrices de riesgo basadas en la categorización de probabilidad e impacto: las cualitativas, las semicuantitativas y las cuantitativas. Las matrices de riesgo cualitativas describen la probabilidad y el impacto de manera cualitativa, estableciendo niveles como "bajo", "medio" o "alto" (según la cantidad de niveles presentes en la matriz). Por el contrario, las matrices de riesgo semicuantitativas representan las categorías de entrada mediante puntuaciones ascendentes, como 1, 2, 3,

entre otras (donde puntuaciones más altas indican un mayor impacto o probabilidad). Finalmente, en las matrices de riesgo cuantitativas, cada categoría recibe una asignación de intervalos numéricos correspondientes a las estimaciones de probabilidad o impacto. Por ejemplo, el nivel de probabilidad "Bajo" se asocia con un intervalo de probabilidad [0,1 0,3] (Li et al., 2018).

Las matrices cualitativas nos sirven para clasificar los riesgos en función de su potencial peligro, en función del lugar que encajen dentro de la matriz. El nivel de riesgo queda definido por el "color" de la celda que le corresponde (a su vez, este dependerá del nivel de probabilidad e impacto), siendo los riesgos clasificados con el color "rojo" los más importantes y los prioritarios a prestarles atención, pero sin distinguir riesgos dentro de las distintas celdas del mismo color.

Por el contrario, las matrices de riesgo cuantitativas nos permiten, no sólo clasificar los riesgos en función de su nivel de riesgo (rojo, amarillo o verde), sino que también, permiten priorizar cada uno de los riesgos dentro del mismo color, indicando cuál de ellos es el más importante. Esto es así porque cada celda, además de tener asignado un color, tiene asignado un valor numérico, normalmente el producto del valor asignado al nivel de probabilidad por el valor asignado al nivel de impacto (Riesgo = probabilidad x impacto).

La matriz de riesgos se utiliza ampliamente, entre otras razones, porque es fácil de construir y sencilla de aplicar en comparación con otras metodologías de evaluación de riesgos (Levine, 2012). Además, proporcionan un marco claro para la revisión sistemática de los riesgos, justifican de forma práctica la clasificación y priorización de los riesgos y mantienen informadas a las partes interesadas de forma visual y atractiva, entre otras razones (Ball and Watt, 2013; Talbot, 2014).

No obstante, son abundantes los autores que han detectado problemas en el uso de las matrices de riesgo (Cox, 2008; Cox et al., 2005; Levine, 2012; Monat and Doremus, 2020;

Figura 1. Matriz de Probabilidad-Impacto.

		Impacto				
		Muy bajo 0.05	Bajo 0.1	Moderado 0.2	Alto 0.4	Muy Alto 0.8
Probabilidad	Muy Alta 0.9	0.045	0.09	0.18	0.36	0.72
	Alta 0.7	0.035	0.07	0.14	0.28	0.56
	Moderada 0.5	0.025	0.05	0.1	0.2	0.4
	Baja 0.3	0.015	0.03	0.06	0.12	0.24
	Muy Baja 0.1	0.005	0.01	0.02	0.04	0.08

Riesgo Bajo ---- Riesgo Moderado ---- Riesgo Alto

Ni et al., 2010; Peace, 2017). Incluso International Organization for Standardization (2019) incluye algunos inconvenientes para su utilización. Los problemas detectados más importantes en el uso de matrices de riesgo para la toma de decisiones estratégicas consisten en que las matrices de riesgo pueden ser imprecisas al comparar riesgos y a veces asignar calificaciones similares a riesgos con diferencias cuantitativas significativas. Además, existe el riesgo de que se otorguen calificaciones cualitativas excesivamente altas a riesgos que son menos graves desde una perspectiva cuantitativa, lo que puede llevar a decisiones subóptimas, especialmente cuando las amenazas tienen correlaciones negativas en términos de frecuencia y severidad. Esta falta de precisión puede resultar en una asignación ineficiente de recursos, ya que no se pueden basar únicamente en las categorías proporcionadas por las matrices de riesgo. Además, la categorización de la gravedad de las consecuencias es subjetiva en situaciones de incertidumbre, y la evaluación de la probabilidad, el impacto y las calificaciones de riesgo dependen en gran medida de la interpretación subjetiva, lo que puede llevar a discrepancias entre diferentes usuarios al evaluar los mismos riesgos cuantitativos.

Con estos antecedentes, diversos autores proponen soluciones a los problemas planteados. Por ejemplo, Levine (2012) propone la utilización de escalas logarítmicas en los ejes de probabilidad e impacto. Por otra parte, Sutherland et al. (2022) sugieren cambiar el tamaño de la matriz,

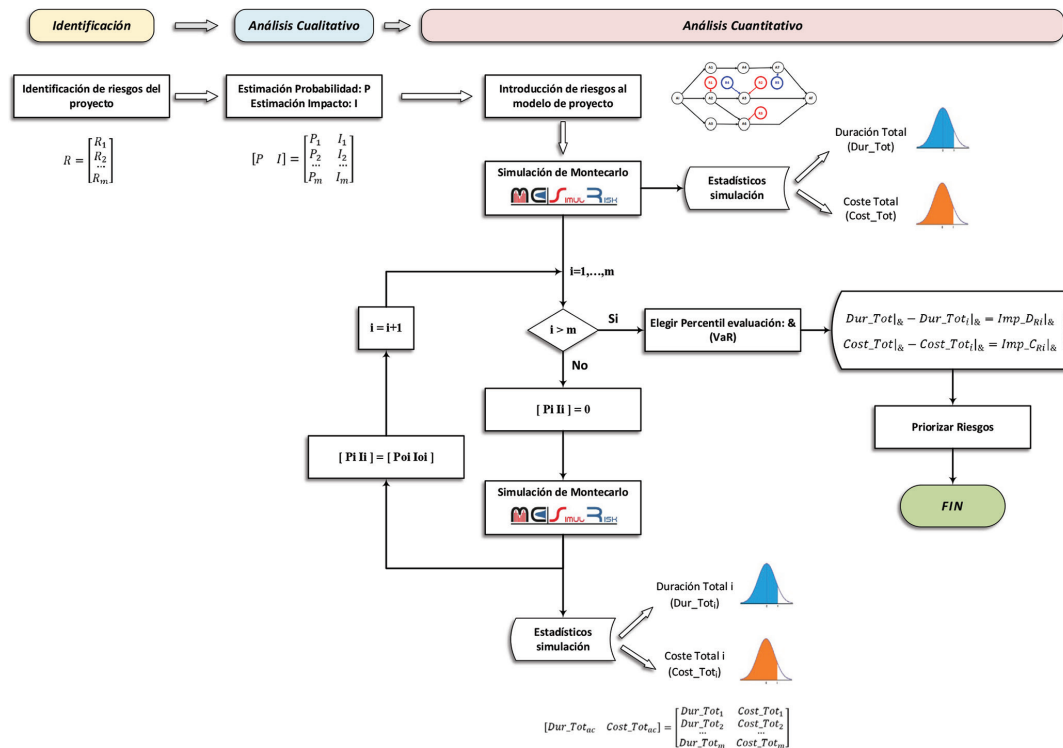
acomodando el tamaño de las celdas a la importancia del riesgo. O Monat y Doremus (2020), que proponen una nueva herramienta de priorización de riesgos.

Siendo conscientes de las dificultades que presentan los resultados ofrecidos por las matrices de riesgo, en la propuesta que presentamos proponemos un método cuantitativo para la priorización de los riesgos. Utilizamos los datos del análisis cualitativo de los riesgos, conservando la estimación realizada sobre la probabilidad de aparición de cada riesgo y su potencial impacto. Pero, en vez de introducir estos datos en la matriz de riesgo, serán incorporados en nuestro modelo de proyecto para realizar simulación de Montecarlo. Como resultado obtendremos una priorización cuantificada de cada uno de los riesgos, diferenciando la importancia de cada riesgo en función del impacto sobre el objetivo de coste y sobre el objetivo de duración.

3. Metodología

El método propuesto para conseguir priorizar los riesgos del proyecto aplicando técnicas cuantitativas lo hemos representado en la Figura 2. Finalizado el proceso, con los riesgos priorizados indicando cuál es el valor absoluto de impacto de cada uno de ellos sobre el proyecto, la organización estará en posición de asignar recursos de manera eficiente a los riesgos más críticos que hayan sido identificados.

Figura 2. Diagrama de Flujo Evaluación Cuantitativa de Riesgos.



En la parte superior del diagrama hemos indicado las fases de riesgo que pertenecen al proceso general para la gestión de los riesgos y, por debajo de ellos, hemos reflejado los pasos del modelo propuesto que estarían enmarcados en cada fase.

El primer paso se corresponde con la “**identificación de los riesgos**” del proyecto. Mediante las técnicas o herramientas que estén establecidas por la organización (*Brainstorming*, técnicas *Delphi*, entrevistas, ...), conseguiremos un listado con los riesgos que tienen capacidad de impactar sobre los objetivos del proyecto.

A continuación, pasamos a la fase de “**estimación de los riesgos**” donde se debe asignar una función de distribución a la probabilidad de que aparezcan cada uno de los riesgos identificados y, también, asignar la función de distribución asociada al impacto del riesgo. Tradicionalmente, el análisis cualitativo del riesgo define valores semánticos (bajo, medio, alto) para asignar un nivel de probabilidad e impacto del riesgo. Estos valores semánticos se utilizan para evaluar el riesgo dentro de la matriz probabilidad - impacto. En algunos casos, se emplean escalas numéricas, que ayudan a asignar un nivel semántico a un determinado riesgo (Figura 3).

En nuestro modelo propuesto, utilizamos los tres tipos de incertidumbre propuestos por Hillson (2014): aleatoria, estocástica y epistémica, para identificar y evaluar los distintos riesgos. Obviamente, no se considera la incertidumbre ontológica ya que se escapa de los límites del conocimiento humano y, por tanto, no puede modelarse (Alleman et al., 2018a).

Un riesgo puede presentar incertidumbre aleatoria en la probabilidad de aparición y, especialmente, en el impacto que produce, si puede fluctuar su valor a lo largo de un rango establecido, debido a su variabilidad. Esta incertidumbre

aleatoria del riesgo puede modelarse mediante una función de distribución de probabilidad (PDF), al igual que hacemos al modelar la incertidumbre de la actividad (Acebes et al., 2015, 2014a). A medida que aumente el conocimiento del equipo de gestión del riesgo (o del equipo de dirección del proyecto) sobre el proyecto y, según se disponga de un mayor número de información respecto del riesgo, la elección de la PDF (normal, triangular, beta, ...) y sus parámetros serán más acertados.

Una definición de riesgo común es “*un evento incierto que, si se produce, puede impactar en los objetivos del proyecto*” (Project Management Institute, 2017). El riesgo definido según la afirmación anterior encaja perfectamente con la definición de incertidumbre estocástica propuesta por Hillson (2014). Y una PDF que modela adecuadamente este tipo de incertidumbre es una función de distribución Bernoulli (Vose, 2008). Así pues, para estimaciones de probabilidad de riesgo deterministas (lo mismo para el impacto del riesgo), modelaremos dicho riesgo (probabilidad y/o impacto) con una PDF tipo Bernoulli, lo que nos permitirá introducir este tipo de incertidumbre en nuestro modelo de simulación.

Finalmente, quedan por modelar las incertidumbres epistémicas, aquellas que no tenemos información absoluta sobre ellas y que surgen por falta de conocimiento (Alleman et al., 2018b; Damnjanovic and Reinschmidt, 2020). En este caso, los riesgos (tanto en términos de probabilidad como de impacto) se clasificarán en distintos niveles, y cada uno de estos niveles tendrá asignado una escala numérica (a diferencia de la metodología empleada en un análisis de riesgos cualitativo, donde los niveles se clasifican utilizando valores semánticos como “alto”, “medio” y “bajo”).

La elección del número y el intervalo de cada uno de estos niveles debe ser objeto de un exhaustivo

Figura 3. Correspondencia de nivel semántico con impacto del riesgo.

Condiciones Definidas para las Escalas de Impacto de un Riesgo sobre los Principales Objetivos del Proyecto (Sólo se muestran ejemplos para impactos negativos)					
Objetivo del Proyecto	Se muestran escalas relativas o numéricas				
	Muy bajo /0,05	Bajo /0,10	Moderado /0,20	Alto /0,40	Muy alto /0,80
Costo	Aumento del costo insignificante	Aumento del costo < 10%	Aumento del costo del 10 - 20%	Aumento del costo del 20 - 40%	Aumento del costo > 40%
Tiempo	Aumento del tiempo insignificante	Aumento del tiempo < 5%	Aumento del tiempo del 5 - 10%	Aumento del tiempo del 10 - 20%	Aumento del tiempo > 20%
Alcance	Disminución del alcance apenas perceptible	Áreas secundarias del alcance afectadas	Áreas principales del alcance afectadas	Reducción del alcance inaceptable para el patrocinador	El elemento final del proyecto es efectivamente inservible
Calidad	Degradación de la calidad apenas perceptible	Sólo se ven afectadas las aplicaciones muy exigentes	La reducción de la calidad requiere la aprobación del patrocinador	Reducción de la calidad inaceptable para el patrocinador	El elemento final del proyecto es efectivamente inservible
Esta tabla muestra ejemplos de definiciones del impacto de los riesgos para cuatro objetivos diferentes del proyecto. Deben adaptarse al proyecto individual y a los umbrales de riesgo de la organización durante el proceso de Planificación de la Gestión de los Riesgos. De forma similar, pueden desarrollarse definiciones del impacto para las oportunidades.					

Fuente: Project Management Institute (2017).

análisis y estudio por parte del equipo de gestión del riesgo. Cada proyecto posee singularidades propias y, por tanto, también lo serán los intervalos en los que este tipo de incertidumbre puede categorizarse. Se aplicarán intervalos distintos para evaluar la probabilidad y el impacto. Además, en el caso del impacto, se realizará una subdivisión adicional para distinguir entre el impacto en la duración y el impacto en los costes del proyecto. Así, por ejemplo, en el caso de modelar la probabilidad, podemos establecer 5 niveles de probabilidad que se corresponderán con los intervalos: [0 0,05], [0,05 0,2], [0,2 0,5], En el caso del impacto, por ejemplo, en duración del proyecto, se pueden establecer 5 niveles que podrían ser: [0 1], [1 4], [4 12], (medido en semanas, por ejemplo).

Modelar este tipo de incertidumbre, requiere de la experiencia del equipo de gestión del riesgo, de datos almacenados sobre proyectos anteriores y de consulta constante a los *stakeholders* del proyecto. A mayor conocimiento se tenga del proyecto, más acertado será el modelo propuesto para cada incertidumbre, tanto en el número de intervalos, como en su magnitud, o en el tipo de función de probabilidad (PDF) elegido para modelar dicho riesgo.

Algunos autores proponen la utilización de funciones de distribución uniformes para modelar este tipo de incertidumbre epistémica, pues refleja perfectamente la falta de conocimiento sobre el resultado esperado (Eldosouky et al., 2014; Vose, 2008). Otros, por el contrario, utilizan funciones triangulares, aunque, para ello, se requiere mayor conocimiento sobre el riesgo (Hulett, 2012). En nuestro caso, y siguiendo el trabajo de Curto et al. (2023, 2022), utilizaremos funciones de distribución uniformes.

Una vez definidos los riesgos identificados en el proyecto, modeladas sus probabilidades e impactos, pasamos a realizar la **priorización cuantitativa** de los riesgos. Comenzamos por incluir en el modelo de proyecto los riesgos identificados, caracterizados por su probabilidad e impacto. La aplicación informática “MCSimulRisk” (Acebes et al., 2023b, 2023a) nos permite realizar simulación de Montecarlo incluyendo todas las incertidumbres identificadas en el proyecto y obtener los estadísticos principales (incluidos percentiles) correspondientes a la duración total del proyecto y al coste total del proyecto.

Almacenados los resultados anteriores, para un tratamiento y utilización posterior, pasamos a ejecutar un bucle que repetiremos tantas veces como número de riesgos identificados tengamos en el proyecto. En cada bucle de repetición anulamos el riesgo correspondiente a cada iteración “i”, de tal manera que eliminamos la probabilidad y el impacto del modelo de simulación. Este nuevo modelo de proyecto, resultado de eliminar el riesgo “i” en cada iteración, se introduce en la aplicación informática para simular con Montecarlo y generar nuevos resultados de duración y

coste total (excluida la incertidumbre “i” en cada simulación). Los valores de probabilidad e impacto retoman su valor original una vez hemos extraído los datos de la nueva simulación.

Realizadas todas las simulaciones (tantas como riesgos hayamos identificado), debemos elegir un percentil de confianza sobre el que calcular la priorización de riesgos (Rezaei et al., 2020; Sarykalin et al., 2008). Dado que los resultados de duración y coste totales que disponemos, obtenidos de a través de simulación de Montecarlo, son estocásticos y presentan variabilidad (por lo tanto, dejan de ser constantes o deterministas), debemos elegir un percentil (&) que transmita el apetito al riesgo que se está dispuesto a asumir al realizar el cálculo. Aunque en términos financieros es tradicional elegir un percentil P95 como apetito al riesgo (*Value at Risk* – VaR) (Kuester et al., 2006), en dirección de proyectos es habitual elegir un percentil P80 como valor más adecuado (Kwon and Kang, 2019; Lorange and Wendling, 2001; Traynor and Mahmoodian, 2019).

Para finalizar, después de elegir el nivel de riesgo que estamos dispuestos a asumir, solo necesitamos calcular cómo cada uno de los riesgos impacta sobre la duración y los costes del proyecto. Para hacer esto, restamos el valor de la duración y los costes totales de una simulación en la que eliminamos el riesgo en cuestión, al valor original de la duración y los costes totales del proyecto (incluyendo todos los riesgos). A partir de ahí, presentamos estos resultados en dos listas separadas, una para el impacto en costes y otra para el impacto en la duración, ordenándolos según su magnitud. Con esto, concluye nuestro enfoque propuesto.

4. Caso de Estudio

4.1. Descripción del proyecto

Ilustramos con un ejemplo la metodología que proponemos en este estudio. Para ello, hemos seleccionado una red de proyecto que ya ha sido utilizada anteriormente en la bibliografía (Acebes et al., 2014b; Lambrechts et al., 2008; Vanhoucke, 2016). En *Tabla 2* detallamos los parámetros que hemos utilizado para definir las actividades.

La duración total del proyecto es de 13 semanas y tiene un coste total planificado de 30.808€. Hemos modelado la incertidumbre aleatoria de las actividades del proyecto conforme a una función de distribución normal. Esto es así para facilitar la comprensión del caso de estudio, pero podría haberse modelado la incertidumbre utilizando otro tipo de función de distribución (triangular, exponencial, ...). Ello no afectaría a la aplicación del método propuesto, pudiendo modificar, en todo caso, los resultados finales.

Aplicando el método propuesto, la primera tarea consiste en **identificar los riesgos** del proyecto (incertidumbres que

Tabla 2. Descripción de actividades del proyecto.

Id Activ.	Duración (semanas)	Desv. Estándar	Coste Variable (€)	Actividad Precedente
Ai	-	-	-	-
A1	2	0,4	755	Ai
A2	4	0,8	1.750	Ai
A3	7	1,2	630	Ai
A4	3	0,4	916	A1
A5	6	1,25	840	A2
A6	4	0,8	1.250	A2, A3
A7	8	1,4	875	A4
A8	2	0,2	250	A6
Af	-	-	-	A7, A5, A8

pueden impactar en el proyecto). En [Tabla 3](#) incluimos un listado de riesgos identificados, diferenciando aquellos que tienen potencial de impactar sobre la duración del proyecto (R1, R2 y R3) y aquellos que pueden hacerlo sobre el coste (R4 y R5). Se indica, también, la actividad que está afectada por cada uno de los riesgos. Los riesgos incluidos en la [Tabla 3](#) son ficticios y únicamente nos sirve para demostrar la eficacia de nuestra propuesta. Lógicamente, en un proyecto real, el equipo de dirección de proyecto tendrá que llevar a cabo una exhaustiva identificación de todos los riesgos de su proyecto.

El siguiente paso consiste en la estimación de la probabilidad y el impacto de los riesgos identificados (**análisis cualitativo**). El equipo de proyecto, una vez analizado el proyecto y consultados los *stakeholders* implicados, determina los intervalos que corresponderán al nivel de probabilidad

para cada riesgo identificado, y el impacto, diferenciando entre impacto en duración e impacto en coste ([Figura 4](#)). En el ejemplo que proponemos, esta estimación es ficticia. En un proyecto real, será fundamental que la estimación sea precisa, que la división en distintos niveles y la asignación de rangos a cada nivel deberá sea acertada. La estimación de los distintos niveles dependerá del presupuesto del proyecto, de la duración estimada del mismo, y de la experiencia del equipo en asignar los distintos valores numéricos a cada intervalo.

En la [Figura 4](#), hemos incluido una matriz de probabilidad-impacto que será utilizada para comparar los resultados de priorización de riesgos que ofrece esta matriz, frente a los que nos proporciona el método propuesto. La matriz tiene asignado un valor en cada celda, así como una diferenciación de zonas de riesgo (“alto”, “medio” y “bajo”). Apoyándonos en las estimaciones de probabilidad e impacto reflejadas en la [Figura 4](#), el equipo de proyecto debe asignar, a cada uno de los riesgos del proyecto, una función de distribución para cada riesgo, diferenciando entre probabilidad e impacto. Así, en las últimas columnas de [Tabla 3](#), se indican qué funciones de distribución le corresponden a probabilidad e impacto para cada riesgo, junto con sus parámetros característicos. Observamos que las funciones asignadas han sido deterministas (tipo Bernoulli), o funciones uniformes.

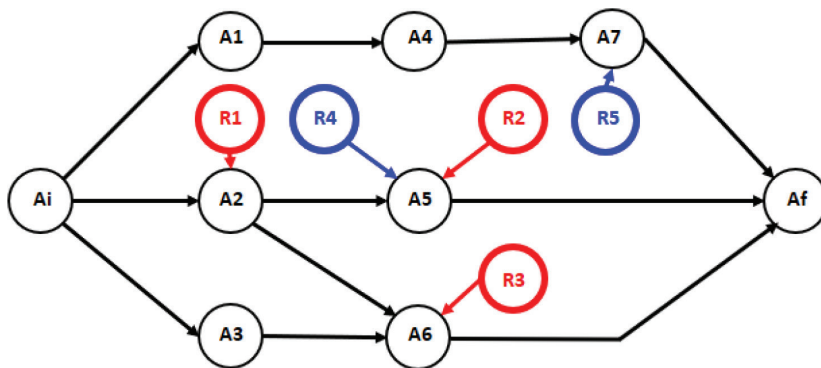
A continuación, siguiendo la metodología propuesta, incorporamos los riesgos en nuestro modelo de proyecto, para realizar simulación de Montecarlo utilizando la aplicación informática “*MCSimulRisk*”. En este ejemplo realizamos 20.000 iteraciones dentro de cada simulación. En la [Figura 5](#) representamos la red de proyecto resultante,

Tabla 3. Descripción de riesgos de duración y coste identificados.

ID Risk_Dur	Activ. Impacto		pdf	μ	min	máx
R1	A2	Probabilidad (%)	Uniforme		0,75	0,8
		Impacto	Uniforme		0,8	1
R2	A5	Probabilidad (%)	Determinista	0,4		
		Impacto	Determinista	5,5		
R3	A6	Probabilidad (%)	Determinista	0,05		
		Impacto	Uniforme		8	10
ID Risk_Cost	Activ. Impacto		pdf	μ	min	máx
R4	A5	Probabilidad (%)	Determinista	0,3		
		Impacto	Determinista	7000		
R5	A7	Probabilidad (%)	Uniforme		0,7	0,8
		Impacto	Uniforme		1500	2500

Figura 4. Estimación de rangos de probabilidad e impacto.

Probabilidad		%					
MUY ALTO (MA)	80-100	0,90	0,05	0,09	0,18	0,36	0,72
ALTO (A)	70-80	0,70	0,04	0,07	0,14	0,28	0,56
MEDIO (M)	40-70	0,50	0,03	0,05	0,10	0,20	0,40
BAJO (B)	5-40	0,30	0,02	0,03	0,06	0,12	0,24
MUY BAJO (MB)	0-5	0,10	0,01	0,01	0,02	0,04	0,08
			0,05	0,1	0,2	0,4	0,8
			0-0,1	0,1-1	1-3	3-6	>6
Impacto Duración			MUY BAJO (MB)	BAJO (B)	MEDIO (M)	ALTO (A)	MUY ALTO (MA)
			0-100	100-1000	1000-5000	5000-10000	>15000
Impacto Coste			MUY BAJO (MB)	BAJO (B)	MEDIO (M)	ALTO (A)	MUY ALTO (MA)

Figura 5. Diagrama de red del proyecto junto con riesgos identificados.


incluyendo los riesgos identificados impactando sobre las actividades del proyecto.

4.2. Resultados y discusión

Como último paso de nuestro modelo propuesto, obtenemos el resultado de la simulación de Montecarlo, que nos proporciona “MCSimulRisk” (Figura 6). Para el percentil elegido (P80) y que representa nuestro apetito al riesgo para este proyecto, la duración del proyecto sería de 16,31 semanas. Es decir, con un 80% de probabilidad, el proyecto finalizará antes de 16,31 semanas. De la misma manera, el P80 correspondiente al coste se sitúa en 40.839€. La aplicación nos ofrece también, en la primera columna de la Figura 6, la duración del proyecto después de eliminar cada uno de los riesgos (correspondientes a un apetito al riesgo

P80). En la columna 2 de la misma figura se representa el coste del proyecto, después de haber eliminado el riesgo correspondiente.

Con los resultados de las dos primeras columnas (duración y coste totales del proyecto, después de eliminar los correspondientes riesgos), así como disponiendo de la duración y coste total del proyecto considerando todos los riesgos, para un percentil dado (P80), conseguimos calcular los valores de las siguientes columnas de la Figura 6. Así, la columna 3 representa la diferencia entre el valor de duración total del proyecto, incluidos todos los riesgos, y la duración del proyecto descontando el riesgo correspondiente. La columna 4 prioriza los riesgos de duración, otorgando un ranking en función de la duración que aporta cada riesgo al proyecto. En columna 5 representamos la diferencia entre el coste total del proyecto, considerando todos los riesgos, y el coste total del

Figura 6. Resultados simulación de Montecarlo "MCSimulRisk".

The Project Duration for this percentile is 16.3181

The Project Cost for this percentile is 4.0839e+04

Quantitative_Prioritisation_of_Risks =

5x6 [table](#)

	Duration_without_R	Cost_without_R	Difference_Duration_without_R	Ranking_Dur	Difference_Cost_without_R	Ranking_Cost
R1	15.837	40038	0.48085	2	801.14	4
R2	14.842	38960	1.476	1	1879.6	2
R3	16.056	40200	0.26178	3	639.44	5
R4	16.318	37857	0	4	2982.6	1
R5	16.318	39291	0	4	1547.8	3

proyecto descontado el riesgo correspondiente. Finalmente, en columna 6, representamos el ranking o priorización de los riesgos del proyecto, según su impacto en el coste.

Por lo tanto, la columna 4 es la que nos ofrece la priorización de los riesgos, si medimos la duración del proyecto. Para el proyecto propuesto como ejemplo comprobamos que el riesgo R2 es el más importante, pues es el riesgo que más duración aporta al proyecto en caso de existir. Observamos que los riesgos R4 y R5 no aportan duración al proyecto. Al ser riesgos que impactan únicamente al coste del proyecto, su contribución a aumentar (o disminuir si fuese el caso) la duración de proyecto es nula.

La columna 6 (Figura 6) representa la priorización de los riesgos identificados, si queremos considerar el coste del proyecto. Así, el riesgo R4 es el más importante, el prioritario, si queremos prestar atención a los costes del proyecto. Es importante resaltar que el riesgo R2 es el segundo riesgo en importancia sobre el impacto en los costes totales del proyecto. El riesgo R2 se identificó inicialmente como riesgo que impacta sobre la duración del proyecto. Pero, al contrario que ocurre con los riesgos de coste (que no impactan en la duración total del proyecto), los riesgos que impactan sobre la duración del proyecto, también lo hacen sobre los costes totales. Esto es así, debido a que el coste variable del proyecto es función de la duración de cada una de las actividades. A medida que la duración de la actividad aumenta, aumenta consigo su coste y, por lo tanto, el coste del proyecto.

En Tabla 4 incluimos un resumen con los resultados de la priorización de los riesgos identificados en el caso de estudio, aplicando por una parte la matriz de probabilidad – impacto (Figura 4) frente a la priorización cuantitativa de los riesgos utilizando nuestro método propuesto con simulación de Montecarlo.

El primer grupo de columnas de la Tabla 4 se corresponden con la implementación de la matriz de riesgo (matriz

de probabilidad-impacto) para los riesgos identificados. Disponemos de la estimación de probabilidad e impacto de cada uno de los riesgos (Tabla 3), y también, del modelo de matriz de riesgo que utilizaríamos para priorizar los riesgos (Figura 4). Con estos datos, podemos asignar un valor semántico de probabilidad (P) y de impacto (I) a cada riesgo. Accediendo con los valores anteriores a la matriz de riesgo (Figura 4) obtendríamos el valor de la casilla correspondiente (PxI) para cada uno de los riesgos. Ordenando los valores anteriores, conseguimos priorizar (ordenar según un Ranking), la importancia de cada riesgo. En Tabla 4, hemos coloreado las celdas del ranking según una escala de color (rojo – amarillo – verde), indicando el color rojo para los riesgos más importantes, más prioritarios y, el color verde, para los riesgos menos importantes, menos prioritarios. Entre medias de estos colores extremos, existe una gama de colores que pasa por el amarillo.

El segundo grupo de columnas se corresponde con la priorización de los riesgos según el impacto en duración (datos obtenidos de la Figura 6), mientras que el tercer grupo de columnas se corresponde con la priorización de los riesgos según su impacto en el coste (datos obtenidos de la Figura 6).

Lo primero que llama la atención es que el orden en importancia de los riesgos identificados no es el mismo dependiendo del método que elijamos (matriz de riesgo frente a priorización cuantitativa). Además, con el método propuesto, cuantificamos el impacto de cada uno de los riesgos sobre los objetivos de coste y duración, de forma independiente. Por otra parte, no sólo conocemos el orden de importancia de los riesgos (1º, 2º, ...), sino en qué magnitud impactan sobre el proyecto (cuál es el retraso en términos absolutos que provoca un riesgo, en duración o, cuál es el sobrecoste absoluto, que genera un riesgo en coste). Tal y como era de esperar, la contribución a la duración total de los riesgos identificados que impactan únicamente sobre el

Tabla 4. Comparación priorización de riesgos: Matriz Probabilidad-Impacto & Método Propuesto.

Matriz Prob - Impacto				Duración (semanas)			Coste (€)			
Riesgo	P	I	P x I	Ranking	Dur_sin_R	Dif_Dur_sin_R	Ranking_Dur	Coste_sin_R	Dif_Cost_sin_R	Ranking_Cost
R1	A	B	0,07	5	15,837	0,481	2	40.038,05	801,14	4
R2	M	A	0,2	1	14,842	1,476	1	38.959,62	1.879,57	2
R3	MB	MA	0,08	4	16,056	0,262	3	40.199,75	639,44	5
R4	B	A	0,12	3	16,318	0,000	4	37.856,57	2.982,62	1
R5	A	M	0,14	2	16,318	0,000	4	39.291,41	1.547,78	3

coste es nula. No ocurre lo mismo con los riesgos identificados que impactan sobre la duración, ya que estos últimos, también impactan sobre el objetivo del coste.

5. Conclusión

La matriz de probabilidad – impacto es una herramienta utilizada en dirección de proyectos que permite conocer cuál es el riesgo al que hay que prestar mayor atención durante la ejecución del proyecto. A lo largo del artículo hemos estudiado cómo es adoptada la matriz de riesgo por una gran mayoría de estándares, normas y metodologías en dirección de proyectos y es, a la vez, reconocida por los profesionales y académicos como una herramienta fundamental dentro del análisis cualitativo de los riesgos.

No obstante, también hemos estudiado cómo la utilización de esta matriz de riesgo presenta determinados problemas y ofrece resultados erróneos y contradictorios. A pesar de ello, sigue siendo una herramienta ampliamente utilizada en la literatura. No obstante, existen estudios que sugieren alternativas a la misma.

Dentro de esta línea, con este trabajo pretendemos ofrecer una alternativa a la utilización de la matriz de probabilidad – impacto como herramienta para conocer cuál es el riesgo más importante del proyecto que puede obstaculizar la consecución de los objetivos de este.

Para ello, hemos propuesto un método cuantitativo, basado en simulación de Montecarlo, que nos ofrece resultados numéricos de importancia de los riesgos sobre el impacto de cada uno de ellos en los objetivos de duración y coste totales. La utilización de esta metodología propuesta ofrece notables ventajas frente a otros métodos y herramientas de priorización de riesgos, especialmente frente a la tradicional matriz de riesgo. En el contexto del caso de estudio propuesto, se ha constatado que la jerarquización de los riesgos arroja resultados notablemente dispares en función del método seleccionado, como ha sido confirmado por nuestros hallazgos.

En nuestro caso, hemos conseguido obtener valores numéricos de impacto de los riesgos en los objetivos de duración y coste totales, de forma independiente. Este

resultado es interesante para el director de proyecto ya que puede centrar la toma de decisiones en función del orden de prioridad de los riesgos y, también, en función del objetivo que domine en el proyecto (duración o coste totales), si no son coincidentes.

De los resultados obtenidos, hemos comprobado que los riesgos que impactan en el coste de las actividades no tienen influencia en el resultado de la duración total. Mientras que, los riesgos que impactan sobre la duración del proyecto también impactan sobre el objetivo de coste total. Incluso este impacto puede ser mayor que el que ocasiona un riesgo que únicamente tiene impacto en el coste de la actividad.

Todo este análisis realizado nos lleva a pensar que este método de priorización cuantitativo tiene un gran potencial para la utilización por parte de los académicos, para la ampliación de sus investigaciones sobre los riesgos de los proyectos, y para los profesionales, que podrían comenzar a utilizar en la implementación diaria de sus proyectos reales.

Indudablemente, una limitación de este estudio es su validación empírica. En este trabajo hemos empleado el enfoque metodológico en el contexto de un escenario ficticio, en el cual se ha presupuesto tanto el modelo de proyecto como las incertidumbres inherentes. No obstante, esta dificultad requerirá ser subsanada mediante su aplicación y puesta en práctica en escenarios de aplicación reales. Ello nos brindará la posibilidad de confrontar los resultados obtenidos y, por ende, certificar la idoneidad del modelo propuesto. Es plausible anticipar que el enfoque propuesto para la priorización de los riesgos que hemos adoptado en el contexto de esta investigación pueda aportar evidencia empírica sólida, en aras de su aplicabilidad en proyectos reales.

Financiación

Esta investigación ha sido parcialmente financiada por la Junta de Castilla y León (España) y el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER) con la subvención VA180P20.

Referencias

- ACEBES, F., CURTO, D., DE ANTÓN, J., VILLAFÁÑEZ, F. (2023a). Análisis cuantitativo de riesgos utilizando “MCSimulRisk” como herramienta didáctica. *Dirección y Organización* “In Press.”
- ACEBES, F., DE ANTÓN, J., VILLAFÁÑEZ, F., POZA, D. (2023b). *A Matlab-Based Educational Tool for Quantitative Risk Analysis, IoT and Data Science in Engineering Management*. Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-27915-7_8
- ACEBES, F., PAJARES, J., GALÁN, J.M., LÓPEZ-PAREDES, A. (2014a). A new approach for project control under uncertainty. Going back to the basics. *International Journal of Project Management*, 32, 423–434. <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2013.08.003>
- ACEBES, F., PAJARES, J., GALÁN, J.M., LÓPEZ-PAREDES, A. (2014b). Exploring the Influence of Seasonal Uncertainty in Project Risk Management. *Procedia Soc Behav Sci*, 119, 329–338. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2014.03.038>
- ACEBES, F., PEREDA, M., POZA, D., PAJARES, J., GALÁN, J.M. (2015). Stochastic earned value analysis using Monte Carlo simulation and statistical learning techniques. *International Journal of Project Management*, 33, 1597–1609. <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2015.06.012>
- ALE, B., BURNAP, P., SLATER, D. (2015). On the origin of PCDS - (Probability consequence diagrams). *Saf Sci*, 72, 229–239. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2014.09.003>
- ALLEMAN, G.B., COONCE, T.J., Price, R.A. (2018a). Increasing the Probability of Program Success with Continuous Risk Management. College of Performance Management. *The Measurable News*, 27–46.
- ALLEMAN, G.B., COONCE, T.J., Price, R.A. (2018b). What is Risk? *The Measurable News*, 01, 25–34.
- AXELOS, 2017. *Managing Successful Projects with PRINCE2®*, 6th editi. Ed. TSO (The Stationery Office).
- BALL, D.J., WATT, J. (2013). Further Thoughts on the Utility of Risk Matrices. *Risk Analysis*, 33, 2068–2078. <https://doi.org/10.1111/risa.12057>
- CHAPMAN, C.B. (1997). Project risk analysis and management--PRAM the generic process. *International Journal of Project Management*, 15, 273–281. [https://doi.org/10.1016/S0263-7863\(96\)00079-8](https://doi.org/10.1016/S0263-7863(96)00079-8)
- CHAPMAN, C.B., WARD, S. (2003). *Project Risk Management: Processes, Techniques and Insights*, 2nd editi. Ed. Chichester, New York.
- COX, L.A. (2008). What's wrong with risk matrices? *Risk Analysis*, 28, 497–512. <https://doi.org/10.1111/j.1539-6924.2008.01030.x>
- COX, L.A., BABAYEV, D., HUBER, W. (2005). Some limitations of qualitative risk rating systems. *Risk Analysis*, 25, 651–662. <https://doi.org/10.1111/j.1539-6924.2005.00615.x>
- CREEMERS, S., DEMEULEMEESTER, E., VAN DE VONDER, S., VONDER, S. VAN DE, (2014). A new approach for quantitative risk analysis. *Ann Oper Res*, 213, 27–65. <https://doi.org/10.1007/s10479-013-1355-y>
- CURTO, D., ACEBES, F., GONZÁLEZ-VARONA, J.M., POZA, D. (2022). Impact of aleatoric, stochastic and epistemic uncertainties on project cost contingency reserves. *Int J Prod Econ*, 253, 108626. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2022.108626>
- CURTO, D., POZA, D., VILLAFÁÑEZ, F., ACEBES, F. (2023). Estimación de las Contingencias de Coste: Aplicación del análisis cuantitativo de riesgos a un proyecto real de Construcción. *DYNA Ingeniería e Industria*, 98, 1–7. <https://doi.org/10.6036/10815>
- DAMNJANOVIC, I., REINSCHMIDT, K.F. (2020). *Data Analytics for Engineering and Construction Project Risk Management, Risk, Systems and Decisions*. Springer International Publishing, Cham.
- DUIJM, N.J., 2015. Recommendations on the use and design of risk matrices. *Saf Sci*, 76, 21–31. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2015.02.014>
- ELDOSOUKY, I.A., IBRAHIM, A.H., MOHAMMED, H.E.D. (2014). Management of construction cost contingency covering upside and downside risks. *Alexandria Engineering Journal*, 53, 863–881. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2014.09.008>
- ELMS, D.G. (2004). Structural safety: Issues and progress. *Progress in Structural Engineering and Materials*, 6, 116–126. <https://doi.org/10.1002/pse.176>
- EUROPEAN COMMISSION, (2018). *Project Management Methodology. Guide 3.0*. Publications Office of the European Union, Brussels / Luxembourg.
- FRANK, M. (1999). Treatment of uncertainties in space nuclear risk assessment with examples from Cassini mission implications. *Reliab Eng Syst Safe*, 66, 203–221. [https://doi.org/10.1016/S0951-8320\(99\)00002-2](https://doi.org/10.1016/S0951-8320(99)00002-2)
- GOERLANDT, F., RENIERS, G. (2016). On the assessment of uncertainty in risk diagrams. *Saf Sci*, 84, 67–77. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2015.12.001>
- HILLSON, D. (2014). How to manage the risks you didn't know you were taking. *PMI® Global Congress*, 1–8.
- HILLSON, D., SIMON, P. (2020). *Practical Project Risk Management. THE ATOM METHODOLOGY*, 3th editi. Ed. Berrett-Koehler Publishers, Inc.
- HULETT, D.T. (2012). *Acumen Risk For Schedule Risk Analysis - A User's Perspective* [WWW Document]. White Paper. <https://info.delttek.com/acumen-risk-for-schedule-risk-analysis> (accessed 5.23.21).
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. (2019). ISO/IEC 31010:2019 Risk management - Risk assessment techniques.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. (2018). ISO 31000 :2018 Risk management – Guidelines.
- INTERNATIONAL PROJECT MANAGEMENT ASSOCIATION. (2015). Individual Competence Baseline for Project, Programme & Portfolio Management. Version 4.0, International Project Management Association. <https://doi.org/10.1002/ejoc.201200111>
- KERZNER, H. (2022). *Project Management. A Systems Approach to Planning, Scheduling, and Controlling*, 13th editi. Ed. New York.
- KOULINAS, G.K., DEMESOUKA, O.E., SIDAS, K.A., KOULOURIOTIS, D.E. (2021). A topsis—risk matrix and Monte Carlo expert system for risk assessment in engineering projects. *Sustainability (Switzerland)*, 13, 1–14. <https://doi.org/10.3390/su132011277>
- KRISPER, M. (2021). *Problems with Risk Matrices Using Ordinal Scales*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2103.05440>
- KUESTER, K., MITTNIK, S., PAOLELLA, M.S. (2006). Value-at-risk prediction: A comparison of alternative strategies. *Journal of Financial Econometrics*, 4, 53–89. <https://doi.org/10.1093/jffinec/nbj002>
- KWON, H., KANG, C.W. (2019). Improving Project Budget Estimation Accuracy and Precision by Analyzing Reserves for Both Identified and Unidentified Risks. *Project Management Journal*, 50, 86–100. <https://doi.org/10.1177/8756972818810963>
- LAMBRECHTS, O., DEMEULEMEESTER, E., HERROELEN, W. (2008). Proactive and Reactive Strategies for Resource-Constrained Project Scheduling with Uncertain Resource Availabilities. *Journal of scheduling*, 11, 121–136. <https://doi.org/10.1007/s10951-007-0021-0>
- LEMMENS, S.M.P., LOPES VAN BALEN, V.A., RÖSELAERS, Y.C.M., SCHEEPERS, H.C.J., SPAANDERMAN, M.E.A. (2022). The risk matrix approach: a helpful tool weighing probability and impact when deciding on preventive and diagnostic interventions. *BMC Health Serv Res*, 22, 1–11. <https://doi.org/10.1186/s12913-022-07484-7>

- LEVINE, E.S. (2012). Improving risk matrices: The advantages of logarithmically scaled axes. *J Risk Res*, 15, 209–222. <https://doi.org/10.1080/13669877.2011.634514>
- LI, J., BAO, C., WU, D. (2018). How to Design Rating Schemes of Risk Matrices: A Sequential Updating Approach. *Risk Analysis*, 38, 99–117. <https://doi.org/10.1111/risa.12810>
- LORANCE, R.B., WENDLING, R. V. (2001). Basic techniques for analyzing and presentation of cost risk analysis. *Cost Engineering*, 43, 25–31.
- MONAT, J.P., DOREMUS, S. (2020). An improved alternative to heat map risk matrices for project risk prioritization. *Journal of Modern Project Management*, 7, 214–228. <https://doi.org/10.19255/JMPM02210>
- NADERPOUR, H., KHEYRODDIN, A., MORTAZAVI, S. (2019). Risk Assessment in Bridge Construction Projects in Iran Using Monte Carlo Simulation Technique. *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, 24, 1–11. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)sc.1943-5576.0000450](https://doi.org/10.1061/(asce)sc.1943-5576.0000450)
- NI, H., CHEN, A., CHEN, N. (2010). Some extensions on risk matrix approach. *Saf Sci*, 48, 1269–1278. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2010.04.005>
- PEACE, C. (2017). The risk matrix: Uncertain results? *Policy and Practice in Health and Safety*, 15, 131–144. <https://doi.org/10.1080/14773996.2017.1348571>
- PROJECT MANAGEMENT INSTITUTE. (2009). *Practice Standard for Project Risk Management*. Project Management Institute, Inc., Newtown Square, Pennsylvania 19073-3299 USA.
- PROJECT MANAGEMENT INSTITUTE. (2017). *A Guide to the Project Management Body of Knowledge: PMBoK(R) Guide*, 6th editi. Project Management Institute Inc., Pennsylvania - USA.
- PROJECT MANAGEMENT INSTITUTE. (2019). *The standard for Risk Management in Portfolios, Programs and Projects*. Project Management Institute, Inc., Newtown Square, PA, USA.
- PROTO, R., RECCHIA, G., DRYHURST, S., FREEMAN, A.L.J. (2023). Do colored cells in risk matrices affect decision-making and risk perception? Insights from randomized controlled studies. *Risk Analysis*, 1–15. <https://doi.org/10.1111/risa.14091>
- QAZI, A., DIKMEN, I. (2021). From risk matrices to risk networks in construction projects. *IEEE Trans Eng Manag*, 68, 1449–1460. <https://doi.org/10.1109/TEM.2019.2907787>
- QAZI, A., SHAMAYLEH, A., EL-SAYEGH, S., FORMANECK, S. (2021). Prioritizing risks in sustainable construction projects using a risk matrix-based Monte Carlo Simulation approach. *Sustain Cities Soc*, 65, 102576. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102576>
- QAZI, A., SIMSEKLER, M.C.E. (2021). Risk assessment of construction projects using Monte Carlo simulation. *International Journal of Managing Projects in Business*, 14, 1202–1218. <https://doi.org/10.1108/IJMPB-03-2020-0097>
- REZAEI, F., NAJAFI, A.A., RAMEZANIAN, R. (2020). Mean-conditional value at risk model for the stochastic project scheduling problem. *Comput Ind Eng*, 142, 106356. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106356>
- SARYKALIN, S., SERRAINO, G., URYASEV, S. (2008). Value-at-Risk vs. Conditional Value-at-Risk in Risk Management and Optimization. *State-of-the-Art Decision-Making Tools in the Information-Intensive Age*, 270–294. <https://doi.org/10.1287/educ.1080.0052>
- SIMON, P., HILLSON, D., NEWLAND, K. (1997). *PRAM Project Risk Analysis and Management Guide*. Association for Project Management, Norwich, UK.
- SUTHERLAND, H., RECCHIA, G., DRYHURST, S., FREEMAN, A.L.J. (2022). How People Understand Risk Matrices, and How Matrix Design Can Improve their Use: Findings from Randomized Controlled Studies. *Risk Analysis*, 42, 1023–1041. <https://doi.org/10.1111/risa.13822>
- TALBOT, J. (2014). *What's right with risk matrices? A great tool for risk managers...* [WWW Document]. 31000risk. <https://31000risk.wordpress.com/article/what-s-right-with-risk-matrices-3dksezemjiq54-4/>. (accessed 2.13.23).
- THE STANDISH GROUP. (2022). *Chaos report* [WWW Document]. <https://standishgroup.myshopify.com/collections/all> (accessed 9.6.23).
- THOMAS, P., BRATVOLD, R.B., BICKEL, J.E. (2014). The risk of using risk matrices. *SPE Economics and Management*, 6, 56–66. <https://doi.org/10.2118/166269-pa>
- TRAYNOR, B.A., MAHMOODIAN, M. (2019). Time and cost contingency management using Monte Carlo simulation. *Australian Journal of Civil Engineering*, 17, 11–18. <https://doi.org/10.1080/14488353.2019.1606499>
- VANHOUCKE, M. (2016). *Integrated Project Management Sourcebook: A Technical Guide to Project Scheduling, Risk and Control*. Springer.
- VATANPOUR, S., HRUDEY, S.E., DINU, I. (2015). Can public health risk assessment using risk matrices be misleading?. *Int J Environ Res Public Health*, 12, 9575–9588. <https://doi.org/10.3390/ijerph120809575>
- VOSE, D. (2008). *Risk Analysis: a Quantitative Guide*, 3rd ed. ed. Wiley, Chichester, U.K.
- WARD, S. (1999). Assessing and managing important risks. *International Journal of Project Management*, 17, 331–336. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0263-7863\(98\)00051-9](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0263-7863(98)00051-9)