

Cómo afecta la varianza al plazo de un proyecto y sus costos.

How variance affects a project's timeframe and costs.

Izar Landeta, Juan Manuel*, Villalón Piña, Olga Edith**,
Ruiz Aguilar, Javier***

*Doctor en Administración. Tecnológico Nacional de México, ITS Rioverde. México.
Email: jmizar@hotmail.com. <https://orcid.org/0000-0002-3187-6481>.

**Maestra en Educación. Tecnológico Nacional de México, ITS Rioverde. México.
Email: oevp.hera@gmail.com. <https://orcid.org/0009-0006-6949-7985>.

***Ingeniero Industrial. Tecnológico Nacional de México, ITS Rioverde. México.
Email: Javier.ra@rioverde.tecnm.mx, ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-5463-3707>.

Correo para recibir correspondencia:

Juan Manuel Izar Landeta
jmizar@hotmail.com

RESUMEN

OBJETIVO: Estudiar el caso de la aplicación de varios métodos para estimar el plazo de un proyecto, a fin de analizar la correlación entre la varianza del proyecto y los plazos de terminación y costos de penalización.

MATERIAL Y MÉTODO: Se aplican varios métodos de estimación del plazo y la varianza de un proyecto, iniciando con PERT y siguiendo con otros métodos derivados de PERT, más la distribución triangular, el método de Ballesteros-Pérez et al. y la simulación de Montecarlo.

RESULTADOS: Se aplicaron los métodos a un caso ilustrativo de un proyecto, siendo los de Suckey y Kim, el de Shankar y Sireesha, el de Golenko-Ginzburg y el de Grubbs, los que dan menor plazo para finalizar el proyecto, así como los costos mínimos de penalización en casos de demora. El PERT ha obtenido una posición intermedia, dejando ver con esto que no es la mejor solución.

CONCLUSIONES: Se confirma que la varianza sí tiene una relación directa tanto con el plazo del proyecto y con sus costos en el caso de demoras. El PERT ha quedado en una posición intermedia tanto en su plazo del proyecto como en los costos de penalización por demoras.

PALABRAS CLAVE: plazo del proyecto, ruta crítica, tiempo esperado de una actividad, varianza de una actividad, distribución beta de probabilidad.

ABSTRACT

OBJECTIVE: To study the application of several methods to estimate the timeframe of a project, in order to analyze the correlation between the variance of the project and the completion of the timeframe and penalty costs.

MATERIAL AND METHOD: Several methods were applied to estimate the timeframe and the variance of the project, starting with PERT and continuing with other methods derived from PERT, along the triangular distribution, the Ballesteros-Pérez et al., and the Montecarlo simulation.

RESULTS: The methods were applied to an illustrative project case. The methods of Suckey and Kim, Shankar and Sireesha, Golenko-Ginzburg, and Grubbs yielded the shortest project completion times and the lowest penalty costs for delays. PERT achieved an intermediate position, indicating that it is not the best solution.

CONCLUSIONS: It is confirmed that variance does have a direct relationship with both the project timeline and its costs in the case of delays. PERT has been placed in an intermediate position both in terms of project timeline and penalty costs for delays.

KEYWORDS: project timeframe, critical path, expected activity time, activity variance, beta probability distribution.

En el ámbito de los proyectos, es de fundamental importancia definir tres aspectos cruciales para alcanzar su éxito, uno de ellos es el costo del proyecto; el segundo, es el plazo de tiempo en que el proyecto debe estar terminado; y el tercero, es el de la calidad del proyecto.

Cabe mencionar que la mayoría de los proyectos fracasan, en términos generales, dos de cada tres proyectos no son exitosos, ya que para que un proyecto lo sea debe cumplir con cada uno de los tres factores antes mencionados a cabalidad y eso no es tarea fácil, ya que requiere del trabajo multidisciplinario y en equipo de varias personas. Entre los grandes proyectos a nivel mundial que han fracasado se pueden mencionar la Construcción del Eurotúnel que pasa por debajo del Mar del Norte para comunicar el continente europeo con Inglaterra, que, a pesar de ser una gran obra de ingeniería, se terminó dos años después de su plazo previsto y costó 3,000 billones de libras esterlinas, prácticamente el doble del presupuesto inicial planeado.

En ese sentido, hay muchos académicos que han estudiado la gestión de proyectos, entre los cuales figuran algunos, siendo de los más reconocidos: Harold Kerzner, director ejecutivo senior de gestión de proyectos del International Institute for Learning de New York; Prasanna Chandra, del Centre for Financial Management and McGraw Hill Education de la India; Ted Klastorin de Washington University y otros muchos que han permitido el desarrollo, difusión y aplicación de esta rama del conocimiento.

Además, se creó desde 1969 el Project Management Institute (PMI), con sede en Newtown Square, Pennsylvania, que es la asociación de más grande del mundo en la actualidad, con más de 738,000 socios distribuidos en la mayoría de los países del mundo (de 185 a 200), que se aboca a la investigación y desarrollo de la gestión de proyectos como una nueva disciplina, que permita la formación de nuevos profesionales. El PMI edita cada año su PMBOK Guide con las novedades que van surgiendo.

Para el caso de proyectos de construcción, Ballesteros-Pérez et al. (2020a) afirman que es usual que tarden y cuesten más de lo planeado, lo cual se debe primordialmente a una mala planeación y control. Esto se genera por la variabilidad en la duración de las actividades, la que se ocasiona por múltiples factores, entre los cuales mencionan los siguientes: diferentes tipos de clientes, los tipos de contratos, la localización, las regulaciones de construcción, la mano de obra, la maquinaria y equipo necesarios, los subcontratistas y los *stakeholders*.

Para que un proyecto sea exitoso (Izar-Landeta, 2017) requiere que se cumplan las factibilidades del mismo, como es el caso de la técnica, la social, legal, de mercado, ambiental y, por supuesto, la económica.

La factibilidad técnica incluye todos los aspectos de manufactura del producto o servicio que se va a producir, como es el tamaño de la planta, su localización, el proceso de manufactura y la estructura organizacional.

La factibilidad social implica tener en cuenta a los *stakeholders* del proyecto, que son todas las personas o instituciones que pueden ser afectados por el proyecto y deberá contarse con su aprobación, ya que, de lo contrario, podrían obstaculizarlo o incluso detenerlo.

La factibilidad legal trae consigo todos los aspectos legales que deben cumplirse para la implementación del proyecto, los que pueden ser de diversos tipos, como: laborales, civiles, sanitarios, comerciales, fiscales y otros.

La factibilidad de mercado abarca los análisis de la demanda y la oferta, la comercialización y la distribución del producto o servicio.

La factibilidad ambiental incluye todas las disposiciones de carácter ambiental, como son el agua, el aire, el suelo e incluso el ruido, las cuales deben respetarse, tratando de cuidar la sustentabilidad del planeta.

Finalmente, la factibilidad económica implica hacer un análisis económico para definir si el proyecto va a producir rentabilidad económica, lo que es deseable, ya que, de no ser así, el proyecto podría aplazarse o en el peor de los casos, cancelarse.

De las metodologías para definir el plazo de tiempo que tomará un proyecto, una de las más antiguas y que se remonta al año 1917 es la de Gantt, quien la aplicó durante la Primera Guerra Mundial a la fabricación de barcos en Estados Unidos. Este método es muy simple y no señala el camino crítico, lo cual lo hace apropiado solamente para proyectos pequeños, que no incluyan demasiadas actividades.

Otra metodología es la ruta crítica CPM, por sus siglas en Inglés (Critical Path Method), la cual apareció también en Estados Unidos a finales de la década de los 50 en Dupont, que la aplicaba para proyectos de mantenimiento a las plantas de manufactura de sus productos. Este método considera que las actividades tienen una duración conocida, por lo cual su aplicación se limita a

proyectos en los que se cuente con experiencia previa, donde el tiempo que tarda una actividad se considera determinístico, tal es el caso de los proyectos de construcción de viviendas y edificios.

Casi al mismo tiempo surgió en Estados Unidos el PERT (Program Evaluation and Review Technique), el cual maneja los tiempos de las actividades de un proyecto de manera probabilística, lo que representa una ventaja ya que puede aplicarse al caso de proyectos nuevos, como son los que implican un alto contenido de nuevas tecnologías o en casos de proyectos de investigación y desarrollo.

Después han aparecido un gran número de metodologías para estimar el tiempo que tarda un proyecto, como es el caso del Algoritmo de Fulkerson, el de la Teoría de las Restricciones de Goldratt y otros muchos que son variantes del PERT (Izar-Landeta et al., 2014).

Respecto a los tiempos de las actividades, su variabilidad impacta al costo de un proyecto de forma directa e indirecta. Los costos de los proyectos se dividen en directos e indirectos, dependiendo si pueden identificarse directamente con una actividad. Los costos directos varían inversamente con el tiempo que tarda el proyecto, mientras que los indirectos varían directa y linealmente con el tiempo. Entre los costos directos se cuentan materiales y mano de obra directa, mientras que en los indirectos suelen aparecer rubros como materiales indirectos, salarios administrativos, seguros, arrendamientos, publicidad y gastos administrativos.

Kartika y Setoawan (2025) afirman que, con una mejor gestión de los riesgos, se reducen los retrasos y los sobrecostos en proyectos del sector de la construcción, lo que implica una relación directa entre la incertidumbre del cronograma y los costos del proyecto.

Otros académicos señalan que la variabilidad de las actividades y los retrasos impactan en la duración total del proyecto, así como en su costo de manera directa (Ramadhan y Waty, 2025; Song y Vanhoucke, 2025).

Ariza-Flores y Zavala-Ascaño (2025) afirman que, en proyectos de construcción de infraestructura de caminos, la incertidumbre en los tiempos genera ineficiencias financieras y conflictos contractuales, los cuales pueden resolverse con simulación de Montecarlo, técnica que integra el riesgo del tiempo y el costo.

Otros estudiosos del tema comentan que la simulación de Montecarlo es de gran utilidad para una mejor planeación de proyectos con altas dosis de incertidumbre (Ebid et al., 2025; Acebes-Senovilla et al., 2025; Aguilar-Cartagena y Pascual-Coronel, 2021).

En cuanto a proyectos de construcción, Italiya et al. (2025) señalan que los sobrecostos son muy comunes, contándose entre las causas principales de ello ajustes en el diseño, mala planeación y comunicación, situaciones ambientales y financieras inesperadas, lo que lleva a no cumplir con el presupuesto de los proyectos. Como solución a esto sugieren el trabajo en equipo, la transparencia y la toma oportuna de decisiones.

Este trabajo hace un comparativo de varios métodos para determinar el tiempo de un proyecto, así como la probabilidad y su costo esperado por retrasos. Se plantea como el objetivo principal ver si la varianza de los proyectos se correlaciona con el costo por terminar después del plazo establecido, dado que la mayoría de los académicos aceptan que, si hay más variabilidad del tiempo de las actividades, el riesgo de que los plazos del proyecto no se cumplan y, por ende, sus costos se incrementen.

Se inicia con PERT, pero se incluyen un buen número de otras metodologías alternas, a fin de analizar las similitudes y diferencias entre ellas.

PERT

El PERT incluye los tiempos de las actividades de manera probabilística con base en la distribución de probabilidad beta, que se considera apropiada, ya que tiene tiempos finitos, una sola moda e incluye 3 tiempos: optimista, pesimista y más probable, y no supone que la distribución deba ser simétrica (Kamburowski, 1997). Estima el tiempo de cada actividad mediante la fórmula siguiente:

$$t_e = \frac{a+4m+b}{6} \quad (1)$$

Donde:

t_e = Tiempo esperado para la actividad.

a = Tiempo optimista para la actividad (tiempo de la actividad si todo sale bien), es la cota inferior de la distribución beta.

m = Tiempo más probable para la actividad (tiempo de la actividad en condiciones normales), es la moda de la distribución beta.

b = Tiempo pesimista para la actividad (tiempo de la actividad si todo sale mal), es la cota superior de la distribución beta.

Por su parte la varianza de cada actividad, σ^2 , se obtiene con la ecuación:

$$\sigma^2 = \left(\frac{b-a}{6}\right)^2 \quad (2)$$

La ruta crítica se define como aquella que obtiene la mayor sumatoria de los tiempos esperados de las actividades de las que consta, mientras que la varianza del proyecto será la suma de las varianzas de las actividades que forman la ruta crítica.

Para el cálculo de que el proyecto se termine en un plazo x de tiempo, se asume que el plazo del proyecto se ajusta a la curva normal de probabilidad, por lo cual se obtiene el valor de z, el número de desviaciones estandarizadas que corresponde a x, con la fórmula siguiente:

$$z = \frac{x-t_p}{\sigma_p} \quad (3)$$

Siendo t_p el plazo del proyecto definido por su ruta crítica, y σ_p la desviación estándar del proyecto.

Con este valor de z se obtiene el área bajo la curva normal, que será la probabilidad de que el proyecto se termine en el plazo x de tiempo.

Por su parte, si hay alguna penalización por finalizar el proyecto en un lapso de tiempo mayor, se puede obtener su valor esperado mediante el producto de la probabilidad de no terminar el proyecto en dicho plazo, multiplicada por el monto de la penalización establecida.

Métodos alternos a PERT

Hay numerosos métodos alternos a PERT, que asumen que las actividades del proyecto se ajustan a la distribución beta de probabilidad, dentro de los cuales se incluirán en este estudio los siguientes:

El primero de estos modelos es el de la distribución triangular (Triangular distribution-Three-point estimating technique, 2023), para el cual se consideran tres tiempos de cada actividad, igual que PERT, siendo su tiempo estimado el siguiente:

$$t_e = \frac{a+m+b}{3} \quad (4)$$

Y la varianza de cada actividad se calcula con la siguiente fórmula:

$$\sigma^2 = \frac{a^2+m^2+b^2-ab-am-mb}{18} \quad (5)$$

Se recomienda utilizar esta distribución cuando se dispone de información limitada sobre los tiempos de duración de las actividades del proyecto.

Otra distribución de probabilidad para estimar la duración de las actividades que sugieren varios académicos es la exponencial (Magott y Skudlarski, 1993; Kulkarni y Adlakha, 1986; Kamburowski, 1985). Sin embargo, Abdelkader (2004) comenta que esta distribución no es adecuada, ya que el tiempo de terminación de las actividades no depende del trabajo restante, además que asume una probabilidad constante de finalización para el siguiente período, independiente de los tiempos de actividad transcurridos y no incorpora el concepto de progreso del trabajo. Por esto, se sugiere usar la distribución Weibull, con la cual el tiempo de duración del proyecto es más confiable y preciso, resultando menor que el que se obtiene con la distribución exponencial.

Entre otras distribuciones de probabilidad se incluye la uniforme, en la cual todos los valores comprendidos entre el límite máximo y mínimo del tiempo de las actividades son igualmente probables y suele usarse cuando la incertidumbre de la duración de las actividades es máxima. Otra puede ser la distribución normal, que resulta apropiada cuando los tiempos de las actividades se concentran alrededor de un valor promedio. También hay quienes han aplicado la distribución lognormal, la cual es recomendable cuando hay proyectos en los que puede haber retrasos grandes, aunque no frecuentes.

En el caso de proyectos de tecnologías de la información (TI), Flyvbjerg et al. (2022) comentan que, habiendo revisado 5,392 proyectos, los sobrecostos siguen una distribución de ley de potencia, habiendo un gran número de proyectos con sobrecostos relativamente pequeños y un número menor de proyectos con sobrecostos grandes.

Hajdu y Bokor (2014) afirman que, usar diferentes distribuciones con la misma estimación de tres puntos, tiene un efecto menor al 10% en la duración del proyecto respecto a la estimación de tres puntos.

Dentro de las metodologías derivadas de PERT, está la de Donaldson (Izar-Landeta et al., 2014), quien plantea las ecuaciones siguientes para obtener la media y varianza del tiempo que tarda cada tarea del proyecto:

$$t_e = \frac{pb + qa}{p + q} \quad (6)$$

$$\sigma^2 = \frac{pq(b - a)^2}{(p + q)^2(p + q + 1)} \quad (7)$$

Siendo p y q parámetros de la distribución de probabilidad, que, en caso que sean iguales a 4 y que la distribución no tenga sesgo, dan lugar a las fórmulas de PERT tradicionales.

Otra opción diferente debida a Grubbs (1962) y que es la que se usa en este trabajo, es que p sea igual a 4.4142 y q sea 1.5858.

Keefe y Verdini (Izar-Landeta et al., 2014) sugieren dos pares de fórmulas con las que afirman se producen resultados más precisos del tiempo esperado y varianza de tiempo de cada actividad:

a) La fórmula extendida de Pearson – Tukey (EPT):

$$t_e = 0.63m + 0.185(b + a) \quad (8)$$

$$\sigma^2 = 0.63(m - t_e)^2 + 0.185[(b - t_e)^2 + (a - t_e)^2] \quad (9)$$

La cual toma los percentiles de 5% para a y 95% para b.

b) La fórmula extendida de Swanson – Megill (ESM):

$$t_e = 0.40m + 0.30(b + a) \quad (10)$$

$$\sigma^2 = 0.40(m - t_e)^2 + 0.30[(b - t_e)^2 + (a - t_e)^2] \quad (11)$$

La cual toma los percentiles de 10% para a y 90% para b.

Otra metodología tradicional es la de Golenko-Ginzburg (1989), que plantea las siguientes fórmulas para el tiempo esperado y la varianza de cada actividad:

$$t_e = \frac{2a+9m+2b}{13} \quad (12)$$

$$\sigma^2 = \frac{(b-a)^2}{1268} \left[22 + 81 \frac{m-a}{b-a} - 81 \left(\frac{m-a}{b-a} \right)^2 \right] \quad (13)$$

Por su parte, Shankar y Sireesha (2009) sugieren usar las siguientes ecuaciones:

$$t_e = \frac{36(m-a)(b-m)m+(b+a)(b-a)^2}{36(m-a)(b-m)+2(b-a)^2} \quad (14)$$

$$\sigma^2 = 0.03(b - a)^2 \quad (15)$$

Farnum y Stanton (1987) proponen las fórmulas siguientes:

$$t_e = \frac{5a+17m+5b}{27} \quad (16)$$

$$\sigma^2 = \frac{(b-a)^2}{35} \quad (17)$$

Chanas and Nowakowski (1988) recomiendan las siguientes ecuaciones:

$$t_e = \frac{a+2m+b}{4} \quad (18)$$

$$\sigma^2 = \frac{7(m-a)^2 + 7(b-m)^2 + 2(m-a)(b-m)}{144} \quad (19)$$

Por su parte, Hahn (2008) sugiere el uso de las ecuaciones siguientes:

$$t_e = \frac{\theta(a+4m+b)+3(1-\theta)(a+b)}{6} \quad (20)$$

$$\sigma^2 = \frac{(b-a)^2(3-2\theta^2)}{36} \quad (21)$$

Siendo θ un parámetro combinado cuyo valor se encuentra entre cero y la unidad y que es inversamente proporcional a la incertidumbre, de modo que cuando vale 1, las fórmulas de Hahn son idénticas a las de PERT. En este estudio se ha tomado el valor de 0.5.

Herrerías-Velasco et al. (2011) proponen la ecuación (1) del PERT para obtener la media y la siguiente para la varianza de cada actividad i:

$$\sigma^2 = \left(\frac{b-a}{6}\right)^2 \left[\frac{5}{7} + \frac{16(m-a)(b-m)}{7(b-a)^2} \right] \quad (22)$$

Por su parte, Ballesteros-Pérez et al. (2020b) a partir de una distribución lognormal, aconsejan usar para la media y desviación estándar de cada actividad, las siguientes ecuaciones:

$$t_e = \frac{a+4m+b}{6} e^{\left[\frac{(2.302CV)^2}{2}\right]} \quad (23)$$

$$\sigma^2 = e^{[(2.302CV)^2-1]} e^{\left[2\ln\frac{a+4m+b}{6} + (2.302CV)^2\right]} \quad (24)$$

Siendo CV el coeficiente de variación de la actividad, que es el cociente de dividir la desviación estándar entre la media del tiempo de cada actividad. Los valores que sugieren los autores para este coeficiente son: 0.1, si la variabilidad es baja, 0.2 si es media y 0.3 si es alta. Para este trabajo se ha considerado un CV de 0.2.

Finalmente, Sackey y Kim (2019) recomiendan aplicar las fórmulas siguientes:

$$t_e = 0.025a + 0.95m + 0.025b \quad (25)$$

$$\sigma^2 = \left(\frac{b-a}{6.43}\right)^2 \quad (26)$$

MATERIAL Y MÉTODO

Se aplican al caso ilustrativo de un proyecto que incluye penalizaciones por terminación tardía, los métodos antes comentados, así como la simulación de Montecarlo realizada en Excel con 10,000 réplicas, a fin de comparar los resultados de los diferentes métodos para determinar el plazo del proyecto, así como el costo esperado en caso de caer en demoras que ameriten una penalización.

Luego se hace un cálculo de la correlación de Spearman entre la varianza del proyecto obtenida con cada método y el costo esperado por demorarse en la finalización del proyecto, para ver si esto confirma lo que muchos de los autores incluidos en el marco teórico han señalado, que con mayor varianza en la duración de las actividades las demoras y los costos se incrementan.

Pueden plantearse las siguientes hipótesis:

- A) Con una mayor varianza del proyecto, el tiempo utilizado para su terminación se incrementa.
- B) Con una mayor varianza del proyecto, el costo de penalizaciones por demoras se incrementa.

APLICACIÓN A UN CASO ILUSTRATIVO

Se tiene un proyecto, para el cual las actividades, sus precedencias y tiempos optimista, a, más probable, m, y pesimista, b, son los siguientes:

Tabla 1
Información del proyecto

Actividad	Actividad Precedente	a	m	b
A	-	10	14	18
B	A	10	15	26
C	B	11	17	23
D	-	13	21	29
E	D	9	14	25
F	E	6	10	14
G	-	10	15	32
H	G	7	15	35
I	H	8	13	18

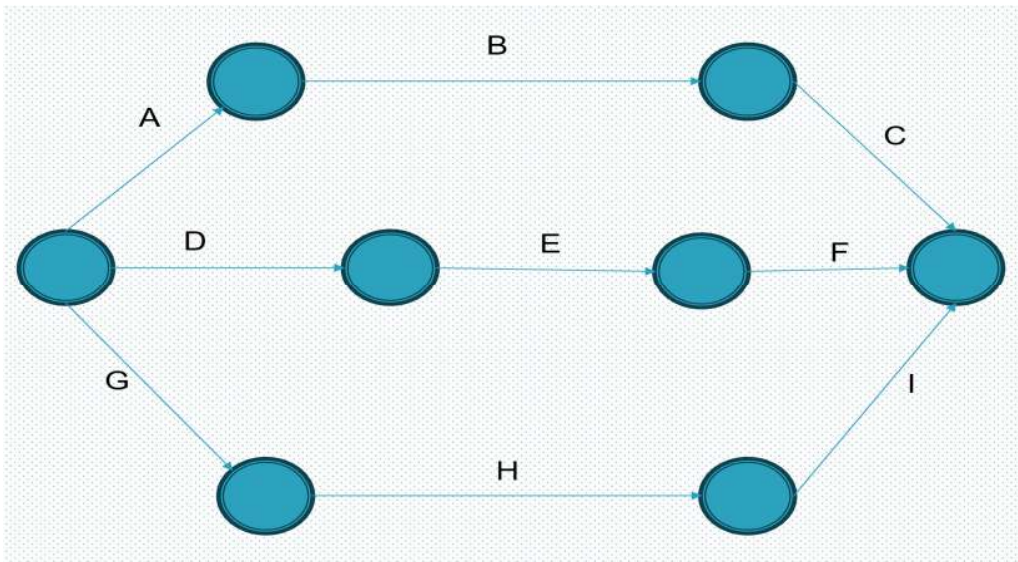
Nota. Elaboración propia.

El proyecto consiste en generar una propuesta importante para llevar a cabo un desarrollo en un sitio turístico, el ramal A-B-C corresponde a actividades que tienen que ver con la factibilidad social, el ramal D-E-F, con labores administrativas y el G-H-I con cuestiones ecológicas.

Para el proyecto el plazo deseado de entrega es 47 días y en caso de tardar más tiempo, habría una penalización de 1.6 millones de pesos si se entrega en 56 días, o de 2.8 millones de pesos si el plazo se extiende a 65 días.

RESULTADOS

Figura 1
Red del proyecto



Nota. Elaboración propia.

Lo primero es aplicar las ecuaciones para el cálculo de los tiempos estimados y las varianzas de cada actividad, a fin de definir la ruta crítica del proyecto. Estos resultados se presentan en la Tabla 2, incluyendo en cada celda tanto el tiempo estimado en días, como la varianza de cada actividad.

Tabla 2
Tiempos estimados y varianzas de las actividades

Método	A	B	C	D	E	F	G	H	I
PERT	14.0, 1.778	16.0, 7.111	17.0, 4.0	21.0, 7.111	15.0, 7.111	10.0, 1.778	17.0, 13.444	17.0, 21.778	13.0, 2.778
Triangular	14.0, 2.667	17.0, 11.167	17.0, 6.0	21.0, 10.667	16.0, 11.167	10.0, 2.667	19.0, 22.167	19.0, 34.667	13.0, 4.167
EPT	14.0, 5.92	16.1, 25.778	17.0, 13.32	21.0, 23.68	15.1, 25.778	10.0, 5.92	17.2, 53.162	17.2, 80.912	13.0, 9.25
ESM	14.0, 9.6	16.8, 40.56	17.0, 21.6	21.0, 38.4	15.8, 40.56	10.0, 9.6	18.6, 81.24	18.6, 126.24	13.0, 15.0
Hahn $\theta=0.5$	14.0, 4.444	17.0, 17.778	17.0, 10.0	21.0, 17.778	16.0, 17.778	10.0, 4.444	19.0, 33.611	19.0, 54.444	13.0, 6.944
Chanas	14.0, 1.778	16.5, 7.861	17.0, 4.0	21.0, 7.111	15.5, 7.861	10.0, 1.778	18.0, 16.444	18.0, 24.778	13.0, 2.778
Shankar	14.0, 1.92	15.6, 7.68	17.0, 4.32	21.0, 7.68	14.6, 7.68	10.0, 1.92	16.4, 14.52	16.3, 23.52	13.0, 3.0
Ginzburg	14.0, 2.132	15.9, 7.955	17.0, 4.798	21.0, 8.53	14.9, 7.955	10.0, 2.132	16.8, 13.827	16.8, 23.823	13.0, 3.332
Grubbs	12.1, 1.778	14.2, 7.111	14.2, 4.0	17.2, 7.111	13.2, 7.111	8.1, 1.778	15.8, 13.444	14.4, 21.778	10.6, 2.778
Farnum	14.0, 1.829	16.1, 7.314	17.0, 4.114	21.0, 7.314	15.1, 7.314	10.0, 1.829	17.2, 13.829	17.2, 22.4	13.0, 2.857
Herrerrías	14.0, 2.286	16.0, 8.571	17.0, 5.143	21.0, 9.143	15.0, 8.571	10.0, 2.286	17.0, 15.0	17.0, 25.714	13.0, 3.571
Ballesteros CV=0.2	15.6, 110.2	17.8, 143.9	18.9, 162.4	23.3, 247.9	16.7, 126.5	11.1, 56.21	18.9, 162.4	18.9, 162.4	14.5, 95.0
Sackey	14.0, 1.548	15.2, 6.192	17.0, 3.483	21.0, 6.192	14.2, 6.192	10.0, 1.548	15.3, 11.706	15.3, 18.962	13.0, 2.419

Nota. Elaboración propia.

Si la ruta crítica se definiese de forma determinística, usando los tiempos más probables de cada actividad, la ruta crítica sería G-H-I, con un plazo del proyecto de 43 días. Sin embargo, esto no es confiable, ya que los tiempos son probabilísticos, sólo se hace este comentario como una referencia. Es de esperarse que, con las metodologías presentadas, las cuales aplican para tiempos aleatorios, los plazos del proyecto se incrementen.

Para el caso del PERT, hay dos rutas críticas empatadas con un plazo del proyecto de 47 días, la A-B-C y la G-H-I, quedando entonces como tal, aquella que tenga la mayor varianza, resultando ser la G-H-I con 38 unidades.

Puede observarse de la Tabla anterior, que, con la metodología de Ballesteros, las varianzas de todas las actividades modeladas por la distribución lognormal han sido mucho mayores que las que se obtienen con los demás métodos, en particular debido a que este académico sugiere esas fórmulas para proyectos grandes de construcción, en los cuales suele haber mayor variabilidad en la duración de las actividades.

A continuación, se presenta en la tabla 3 para cada metodología, la ruta crítica, su tiempo estimado de terminación, la desviación estándar del proyecto, la probabilidad de terminar el proyecto en el plazo señalado de 47 días y los costos esperados de penalización por finalizar en 56 o 65 días, los cuales se obtienen multiplicando el costo de la penalización establecida para cada plazo por la probabilidad de no terminar el proyecto en dicho plazo:

Tabla 3
Comparativo de los métodos

Método	Ruta Crítica	Tiempo del Proyecto, días	Desv. Estándar del Proyecto, días	Probab. 47	Costo 56, Miles \$	Costo 65, Miles \$
PERT	G-H-I	47.0	6.164	0.500	115.43	4.90
Triangular	G-H-I	51.0	7.810	0.304	417.6	103.6
EPT	G-H-I	47.4	11.972	0.485	379.68	199.41
ESM	G-H-I	50.2	14.916	0.415	557.91	449.51
Hahn	G-H-I	51.0	9.747	0.341	486.37	211.26
Chanas	G-H-I	49.0	6.633	0.382	233.03	22.21
Shankar	A-B-C	46.6	3.731	0.541	9.52	0.00
Ginzburg	A-B-C	46.9	3.858	0.508	14.91	0.00
Grubbs	G-H-I	40.9	6.164	0.840	11.23	0.13
Farnum	G-H-I	47.4	6.252	0.472	136.93	6.98
Herrerías	G-H-I	47.0	6.655	0.500	140.99	9.57
Ballesteros	G-H-I	52.2	20.491	0.399	683.98	747.54
Sackey	A-B-C	46.2	3.350	0.600	2.62	0.00
Simulación	-	54.0	4.704	0.068	536.57	27.11

Nota. Elaboración propia.

En cuanto a la ruta crítica, tres de los métodos presentados han definido como tal a la A-B-C, el de Shankar, el de Ginzburg y el de Sackey, para el resto de las metodologías ha sido la G-H-I. En el caso de la simulación cada una de las tres rutas puede ser la crítica, de hecho, en las 10,000 réplicas, resultó ser la A-B-C el 37.21% de las veces, la D-E-F 29.13% y la G-H-I el 33.66%. El plazo del proyecto en la simulación varió significativamente, desde un mínimo de 36 hasta un máximo de 85 días, con una media de 54 días.

En lo que corresponde a la probabilidad de terminar el proyecto en 47 días, hay 6 métodos con los que se cumple, que son PERT, Shankar, Ginzburg, Grubbs, Herrerías y Sackey siendo el de Grubbs el que resulta con el tiempo esperado mínimo del proyecto y, por ende, con la probabilidad máxima de su terminación en dicho plazo, con 84%. Estas metodologías que han cumplido con el plazo se han sombreado en amarillo.

Por lo que hace a las desviaciones estándar del proyecto, las metodologías con los valores mínimos han sido las de Sackey, Shankar y Ginzburg, seguidas de la simulación, PERT, Grubbs y Farnum, las cuales también se han sombreado en amarillo.

En cuanto a las penalizaciones, el valor esperado mínimo resultó con el método de Sackey con un monto de \$2,620, seguido de Shankar, con \$9,520 para un plazo de 56 días y para el caso de 65 días, el valor esperado de la penalización es cero para las metodologías de Sackey, Shankar y de Ginzburg y de \$130 con el modelo de Grubbs. Algo que vale la pena mencionar que para los 3 métodos en que la penalización ha sido cero, la ruta crítica fue A-B-C en los 3 casos.

En cuanto al análisis de correlación entre la varianza del proyecto obtenida con cada método y el tiempo esperado para su conclusión, el coeficiente de correlación de Spearman resulta en un valor de 0.626, que hace ver que la correlación es directa, aunque no es fuerte.

Por su parte, para la correlación entre la varianza del proyecto y el costo esperado de penalizaciones, el coeficiente de Spearman resultó 0.812 para 56 días y de 0.919 para 65 días, ambas correlaciones son fuertes y positivas, lo que permite establecer que para el caso de la segunda hipótesis se confirma la relación entre las variables, con mayor varianza, mayores costos de penalización.

CONCLUSIONES

En resumen, los métodos con los valores mínimos de la desviación estándar del proyecto han sido Sackey, Shankar, Ginzburg, Grubbs y la simulación, y los valores máximos han sido el de Ballesteros, seguido de la fórmula extendida de Swanson-Megill y el de Hahn, que coinciden en ser los modelos con las mayores desviaciones estándar del proyecto.

Algo que vale la pena resaltar es que, con las fórmulas de Ballesteros, las varianzas de todas las actividades han sido mucho mayores que las obtenidas con las restantes metodologías, en parte debido a la distribución lognormal, lo que también ha generado que los costos de penalización por la demora del proyecto sean mayores. Ballesteros recomienda el uso de estas fórmulas solo

para el caso de proyectos grandes de construcción, que suelen tener alta incertidumbre en sus plazos de terminación.

Un hallazgo de este estudio ha sido que, con mayores varianzas de la duración de las actividades, aumentan tanto el plazo como el costo de las demoras del proyecto, lo que concuerda con lo señalado por varios estudiosos del tema (Kartika y Setoawan, 2025; Ramadhan y Waty, 2025; Song y Vanhoucke, 2025).

También cabe mencionar que, con la Simulación, la ruta crítica puede variar en cada réplica, lo que en principio podría considerarse una desventaja, pero no lo es, ya que, al manejar probabilidades de los eventos, todo puede ser posible.

Con esto puede verse que el PERT, que es el método que dio lugar a la gran mayoría de las metodologías incluidas en este trabajo, no es el mejor, ya que hay otras opciones que permiten estimar los plazos del proyecto y los costos de penalización en caso de demora.

Para afirmar si un método es mejor que otro, habría que confrontar los tiempos que se estiman para un proyecto con cada método, con los plazos reales en que se han terminado, lo cual constituye una limitante de este estudio que puede dar lugar a investigaciones posteriores, ya que, no por el hecho que un método dado estime un plazo menor para la culminación del proyecto, quiere decir que ese método sea el mejor, en todo caso es el más optimista, lo cual debe confrontarse con los datos de la realidad.

Otra de las recomendaciones para trabajos subsecuentes sería la de incluir otras distribuciones de probabilidad, tanto para los tiempos de las actividades, como para la estimación de las probabilidades de los plazos de los proyectos, los cuales se han supuesto que siguen una distribución normal.

REFERENCIAS

- Abdelkader, Y. H. (2004). Evaluating Project completion times when activity times are Weibull distributed. *European Journal of Operational Research*, 157, 704-715, [https://doi.org/10.1016/S0377-2217/\(03\)00269-8](https://doi.org/10.1016/S0377-2217/(03)00269-8).
- Acebes-Senovilla, F., González-Varona, J. M., Pajares-Gutiérrez, J., & López-Paredes, A. (2025). Simulación Monte Carlo como herramienta para priorizar los riesgos de los proyectos. *Dirección y Organización*, 85, 43-56, <https://doi.org/10.37610/85.689>.

- Aguilar-Cartagena, C. C. y Pascual-Coronel, R. S. (2021). *Predicción y evaluación en el sistema de gestión de tiempos y costos mediante el enfoque ANSI – 748 Montecarlo y su impacto en proyectos urbanísticos de la municipalidad de Carabayllo 2020* [Tesis de licenciatura no publicada]. Universidad Privada del Norte.
- Ariza-Flores, V. A. y Zavala-Ascaño, G. (2025). Quantitative risk analysis framework for cost and time estimation in road infrastructure projects. *Infrastructures*, 10(6), 139, <https://doi.org/10.3390/infrastructures10060139>.
- Ballesteros-Pérez, P., Cerezo-Narváez, A., Otero-Mateo, M., Pastor-Fernández, A., Zhang, J. y Vanhoucke, M. (2020a). Forecasting the Project Duration Average and Standard Deviation from Deterministic Schedule Information. *Applied Sciences*, 10, 654, <https://doi.org/10.3390/app10020654>.
- Ballesteros-Pérez, P., Sanz-Ablanedo, E., Soetanto, R., González-Cruz, M.C., Larsen, G.D. y Cerezo-Narváez, A. (2020b). Duration and cost variability of construction activities: An empirical study. *Journal of Construction Engineering and Management*, 146(1), [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0001739](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001739).
- Chanas, S. y Nowakowski, M. (1988). Single value simulation of fuzzy variable. *Fuzzy Sets and Systems*, 25(1), 43-57. [https://doi.org/10.1016/0165-0114\(88\)90098-X](https://doi.org/10.1016/0165-0114(88)90098-X).
- Ebid, A. M., Ammar, T., Mahdi, I. y Hegazy, H. (2025). Evaluating the planning efficiency for repetitive construction projects using Monte Carlo simulation. *Scientific Reports*, 15(1), 27520. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-12779-w>.
- Farnum, N. R. y Stanton, L. W. (1987). Some results concerning the estimation of beta distribution parameters in PERT. *Journal of the Operations Research Society*, 38(3), 287-290.
- Flyvbjerg, B., Budzier, A., Lee, J. S., Keil, M. y Lunn, D. (2022). The empirical reality of IT project cost overruns: Discovering a power-law distribution. *arXiv*. <https://arxiv.org/abs/2210.01573>.
- Golenko-Ginzburg, D. (1989). PERT assumptions revisited. *Omega*, 17, 393-396.
- Grubbs, F. E. (1962). Attempts to validate certain PERT statistics or 'Picking on PERT'. *Operations Research*, 10, 912-915.
- Hahn, E. (2008). Mixture densities for project management activity times: A robust approach to PERT. *European Journal of Operational Research*, 210, 450-459.
- Hajdu, M. y Bokor, O. (2014). The Effects of Different Activity Distributions on Project Duration in PERT Networks. *Procedia – Social and Behavioural Sciences*, 119, 766-775. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2014.03.086>.
- Herrerías-Velasco, J. M., Herrerías-Pleguezuelo, R. y Van Dorp, J. R. (2011). Revisiting the PERT mean and variance. *European Journal of Operational Research*, 210, 448-451. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2010.08.014>.
- Italiya, D. G., Pitroda, J. R. y Raichura, C. (2025). A comprehensive review of cost overrun factors in construction projects. *International Journal of Scientific Research in Engineering and Management*, 9(11), 1-9. <https://doi.org/10.55041/ijrsrem53645>.

- Izar-Landeta, J. M. (2017). Cómo implementar un proyecto exitoso. *Revista Conexión de Economía y Administración*, 3(8), 9-13. <https://www.aliatuniversidades.com.mx/conexxion/portada?s=89>
- Izar-Landeta, J. M., Castillo-Ramírez, A. y Hernández-García, V. (2014, 23 de abril). *Métodos alternos para subsanar las limitaciones de PERT al estimar el plazo de un proyecto*. Congreso Anual de Investigación en Ciencias Administrativas, ACACIA y Universidad Autónoma de Baja California, Tijuana, B. C. DOI: 10.13140/RG.2.1.3553.5529.
- Kamburowski, J. (1985). An upper bound on the expected completion time of PERT networks. *European Journal of Operational Research*, 21(2), 206-212. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(85\)90032-3](https://doi.org/10.1016/0377-2217(85)90032-3).
- Kamburowski, J. (1997). New validations of PERT times. *Omega*, 25(3), 323-328. [https://doi.org/10.1016/S0305-0483\(97\)00002-9](https://doi.org/10.1016/S0305-0483(97)00002-9).
- Kartika, D. y Setiawan, B. (2025). The Economic Impact of Project Risk Management on Cost Efficiency and Time Performance in Medium-Scale Construction Projects. *Mustard Journal De Ecobusin*, 2(4), 204-217. <https://doi.org/10.37899/mjde.v2i4.274>.
- Kulkarni, V. G. y Adlakha, V. G. (1986). Markov and Markov-regenerative PERT network. *Operations Research*, 34(5), 769-781. <https://doi.org/10.1287/opre.34.5.769>.
- Magott, J. y Skudlarski, K. (1993), Estimating the mean completion time of PERT networks with exponentially distributed duration of activities. *European Journal of Operational Research*, 69(3), 360-370, [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(93\)90131-Q](https://doi.org/10.1016/0377-2217(93)90131-Q).
- Ramadhan, J. S. y Waty, M. (2025). Impact of Change Orders on Cost Overruns and Delays in Large-Scale Construction Projects. *Engineering, Technology and Applied Science Research*, 15(1), 20291-20299, <https://doi.org/10.48084/etasr.9449>.
- Sackey, S. y Kim, B-S. (2019). Schedule Risk Analysis using a Proposed Modified Variance and Mean of the Original Program Evaluation and Review Technique Model. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 23(4), 1484-1492. <https://doi.org/10.1007/s12205-019-1826-z>.
- Shankar, N. R. y Sireesha, V. (2009). An Approximation for the Activity Duration Distribution, Supporting Original PERT. *Applied Mathematical Sciences*, 3(57), 2823-2834.
- Song, Y. y Vanhoucke, M. (2025). Schedule risk analysis for project control with risk interactions. *Annal of Operations Research*, <https://doi.org/10.1007/s10479-025-06668-8>.
- Triangular distribution—Three-point estimating technique. (2023, abril14). <https://www.projectmanagement.com/wikis/540506/triangular-distribution---three-point-estimating-technique>.