

01-005

COMPARISON OF THE ACCURACY OF COST PREDICTION METHODS WITH EARNED VALUE ANALYSIS

Barrientos-Orellana, Alexis (1); Ballesteros-Pérez, Pablo (2); Mora-Melià, Daniel (1);
Cerezo-Narváez, Alberto (3)

(1) Universidad de Talca, (2) Universitat Politècnica de València, (3) Universidad de Cádiz

Forecasting the final cost of a project is a major concern for project professionals. Earned Value Management (EVM) is a deterministic project monitoring and control technique that also makes forecasting the final project cost possible. However, previous research on EVM's forecasting accuracy has compared only a small number of deterministic cost prediction methods (named EAC). In addition, the reduced number of projects used in previous comparisons has also been questioned by some researchers. This study compares the accuracy of 15 EVM EAC methods. The accuracy of these EAC methods is tested under a calculation framework with 4100 artificial projects of varied topological structures. The accuracy of the EAC methods is measured with Mean Square Errors (MSE), Mean Percentage Errors (MPE) and Mean Absolute Percentage Errors (MAPE). The accuracy is also measured at 10% project progress intervals. Our results evidence that the EAC methods achieve high accuracy from the last third of execution onwards. The methods $EAC=AC+(BAC-EV)$ and $EAC=AC+(BAC-EV)/(\alpha CPI+\beta SPI(t))$ stand out as the ones with the highest accuracy. Knowing the accuracy of the superior performance of some EAC methods against others will allow project professionals to choose the best of them to forecast the project duration more accurately.

Keywords: earned value management; forecasting; cost; accuracy

COMPARACIÓN DE PRECISIÓN DE LOS MÉTODOS DE PREDICCIÓN DEL COSTO CON ANÁLISIS DEL VALOR GANADO

Pronosticar con precisión el costo final del proyecto es una de las principales preocupaciones para los profesionales de dirección de proyectos. El Análisis del Valor Ganado es una técnica que permite obtener una estimación del costo final del proyecto. Investigaciones acerca de precisión han comparado un número reducido de métodos de predicción del costo (EAC). Además, el reducido tamaño de las bases de datos de proyectos utilizadas en investigaciones previas ha sido cuestionada por varios investigadores. Este estudio compara la precisión de 15 métodos deterministas EAC en EVM bajo un marco de cálculo con 4100 proyectos artificiales de diferentes estructuras topológicas. Para comparar la precisión de los métodos EAC se utilizan los Errores Cuadráticos Medios (MSE), los Errores Porcentuales Medios (MPE) y los Errores Porcentuales Medios Absolutos (MAPE). La precisión de los métodos se mide a intervalos de 10% del progreso del proyecto. Nuestros resultados sugieren que los métodos EAC logran una alta precisión a partir del último tercio del proyecto. Los métodos $EAC=AC+(BAC-EV)$ y $EAC=AC+(BAC-EV)/(\alpha CPI+\beta SPI(t))$ alcanzan la mejor precisión. Conocer anticipadamente la precisión de los métodos EAC permitirá a los profesionales de dirección de proyectos el recurrir a las mejores técnicas disponibles para pronosticar la duración de sus proyectos.

Palabras clave: análisis de valor ganado; predicción; costo; precisión

Correspondencia: Alexis Barrientos Orellana. Correo: alexis.barrientos@utalca.cl

Agradecimientos: El primer autor agradece a la Universidad de Talca por su Beca del Programa de Doctorado (RU-056-2019).



©2022 by the authors. Licensee AEIPRO, Spain. This article is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. Introducción

Predecir el costo final de cualquier proyecto es una información de gran utilidad para los profesionales de proyectos. El Análisis de Valor Ganado, o *Earned Value Management (EVM)* en inglés, es una técnica determinista que permite medir el progreso del proyecto en las dimensiones de tiempo y costo, así como anticipar su duración y costo finales. EVM es una de las técnicas más sencillas a nivel conceptual y solamente requiere para su implementación de la información de las duraciones, costos y porcentajes de avance de las actividades en progreso o ya terminadas (Wauters y Vanhoucke 2017). Por estos motivos, EVM es una de las técnicas más utilizadas para el efectivo seguimiento y control de proyectos.

EVM combina los parámetros Valor Planeado (PV), Valor Ganado (EV) y Costo Real (AC) para analizar el rendimiento del proyecto. PV se refiere al presupuesto asignado al trabajo planeado; EV es el presupuesto planeado para el trabajo realizado; mientras que AC es el costo real acumulado del proyecto. EVM incorpora los índices de rendimiento del cronograma SPI y SPI(t) para medir el adelanto o retraso del proyecto, ambos respecto de lo planificado (Barrientos-Orellana et al., 2022). También incluye el índice de rendimiento del costo CPI para conocer si el costo real está por encima o por abajo de lo presupuestado.

Durante los últimos años, especialmente desde que Lipke (2003) propuso la métrica de la Programación Ganada (*Earned Schedule, ES*), se han propuesto un gran número de métodos deterministas para predecir el costo final del proyecto. Estos métodos, comúnmente denominados EAC (*Estimated cost At Completion*), combinan diferentes indicadores y métricas generados en los cálculos habituales de EVM. Sin embargo, la mayoría de estos métodos EAC no han sido comparados hasta la fecha en cuanto a su precisión. Adicionalmente, las bases de datos utilizadas en estudios previos contienen una cantidad reducida de proyectos. Finalmente, estudios previos han medido la precisión de los métodos EAC mayoritariamente solo con los Errores Porcentuales Medios Absolutos (MAPE). Todas estas limitaciones serán abordadas en nuestro estudio.

2. Objetivo

Este estudio medirá la precisión de 15 métodos deterministas de pronóstico del costo o EAC, utilizados frecuentemente en la metodología EVM. El término 'precisión' se refiere a la capacidad de un método EAC de anticipar el costo final del proyecto antes de que este se complete. La precisión de los métodos EAC de este estudio se calcula con los Errores Cuadráticos Medios (MSE), los Errores Porcentuales Medios (MPE), y los Errores Porcentuales Medios Absolutos (MAPE). Esto bajo un marco de cálculo de 4100 proyectos simulados de diferentes topologías. El término topología se refiere a las propiedades que presentan las redes de proyectos, es decir, a la distribución de actividades sucesoras y predecesoras (Vanhoucke et al. 2008).

3. Revisión de literatura

Los métodos deterministas EAC utilizados con mayor frecuencia en EVM durante los últimos 30 años y que además serán comparados en este estudio se presentan en la Tabla 1. La primera columna asigna una identificación numérica (ID) a los métodos. La segunda columna identifica al método por cada métrica. La tercera columna identifica la métrica estudiada en cada método. En la cuarta columna se muestran las expresiones matemáticas del método EAC. En la última columna se indica a los autores de cada método EAC. En los métodos EAC, BAC es el costo previsto total del proyecto (antes de iniciar). Y PF se refiere al factor de rendimiento futuro del proyecto.

Tabla 1: Métodos de pronóstico del costo EAC del proyecto

ID	Método	EAC	Expresión	Autores
1	EVM	V1	$EAC_{V1} = AC + (BAC-EV)$	
2	EVM	V2	$EAC_{V2} = AC + (BAC-EV)/CPI$	
3	EVM	V3	$EAC_{V3} = AC + (BAC-EV)/SPI$	(Christensen, 1999)
4	EVM	V4	$EAC_{V4} = AC + (BAC-EV)/SCI$	
5	EVM	V5	$EAC_{V5} = AC + (BAC-EV)/(\alpha CPI + \beta SPI)$	
6	EVM	ES1	$EAC_{ES1} = AC + (BAC-EV)/SPI(t)$	
7	EVM	ES2	$EAC_{ES2} = AC + (BAC-EV)/SCI(t)$	(Lipke, 2003)
8	EVM	ES3	$EAC_{ES3} = AC + (BAC-EV)/(\alpha CPI + \beta SPI(t))$	
9	EVM	SP1	$EAC_{SP1} = BAC/SCI$	(Anbari, 2003)
10	ESM	ESM1	$EAC_{ESM1} = AC + (BAC-EV(e))/SPI(t)(e)$	
11	ESM	ESM2	$EAC_{ESM2} = AC + (BAC-EV(e))/CPI(e)$	(Lipke, 2012)
12	ESM	ESM3	$EAC_{ESM3} = AC + (BAC-EV(e))/SCI(t)(e)$	
13	XSM	XSM1	$EAC_{XSM1} = AC + (BAC-EV)/T_{t, EDI}$	(Khamooshi y Abdi, 2017)
14	XSM	XSM2	$EAC_{XSM2} = AC + (BAC-EV)/T_{t, SPI(t)}$	
15	XSM	XSM3	$EAC_{XSM3} = AC + (BAC-EV)/(T_{t, EV}/T_{t, AC})$	(Batselier y Vanhoucke, 2017)

En el método 1, el valor $PF=1$. Es decir, se espera que el trabajo restante del proyecto se realice según lo previsto. En el método 2, $PF=CPI$. Por tanto, el trabajo futuro del proyecto seguirá la tendencia actual de los costos. En el método 3, $PF=SPI$. Esto significa que el trabajo restante se ejecutará según la tendencia del trabajo realizado, en relación con el cronograma del proyecto. En el método 4, el valor de $PF=SCI$. En otras palabras, se espera que el rendimiento futuro del proyecto siga la tendencia actual de tiempo y costo en función de CPI y SPI . Mientras que, en el método 5 el valor de $PF=\alpha CPI + \beta SPI$. En este estudio, α asume un valor de 0.8. Mientras que $\beta=0.2$. Tanto α como β mantienen los valores asignados por el autor.

En el método 6, el valor de $PF=SPI(t)$. Es decir, el proyecto seguirá la tendencia del índice de desempeño de la Programación Ganada (ES) medida hasta la Duración Actual (AT). En el método 7, el valor de $PF=SCI(t)$. Por tanto, los costos del proyecto seguirán la tendencia actual de costo y tiempo. En el método 8, el valor de $PF=\alpha CPI + \beta SPI(t)$. Los valores asignados a α y β son similares a los utilizados en el método 5.

En el método 9 BAC se refiere al costo previsto total del proyecto (antes de iniciar). Mientras que $SCI=SPI \cdot CPI$. Tanto SPI como CPI son los índices de desempeño de tiempo y costo medidos hasta la Duración Actual (AT).

Los métodos 10 a 12 reemplazan la Programación Ganada (ES) por el Índice de Cumplimiento Efectivo de la Duración $ES(e)$. $ES(e)$ incorpora el Factor-P, el cual representa el grado de cumplimiento del proyecto. Factor-P varía entre 0 y 1. Si $P=0$, indica que el cumplimiento del proyecto no está de acuerdo con lo planificado, mientras que si $P=1$, existe conformidad perfecta.

Los métodos 13 a 15 incorporan una métrica con suavizado exponencial en EVM. $T_{t, EDI}$ se refiere al suavizado exponencial por periodo de tiempo en función del desempeño obtenido hasta la Duración Actual (AT). $T_{t, SPI(t)}$ es el suavizado exponencial en función de la Programación Ganada (ES). Y $T_{t, EV/AC}$ se refiere al suavizado exponencial que incorpora los costos actuales y el valor ganado del proyecto medido hasta el AT.

Las investigaciones previas que han medido la precisión de los métodos EAC se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2. Resumen de investigaciones sobre precisión de los métodos EAC

Estudio (Referencia)	Precisión			Nº proyectos		Métodos EAC	
	MAPE	MPE	MSE	Artificiales	Reales	Analizados	Destacados
Zwikael et al. (2000)	✓	-	✓	-	12	1, 4 y 9	9
Wauters y Vanhoucke (2015)	✓	-	-	90	2	1-8	1 y 2
Batselier y Vanhoucke (2015)	✓	-	-	-	51	1-8	1
Batselier y Vanhoucke (2017)	✓	-	-	-	23	1 y 2	-
Este estudio	✓	✓	✓	4100	-	1-15	1 y 8

Las investigaciones previas coinciden que los métodos con mejor rendimiento (precisión) son los 1, 2 y 9. Sin embargo, trabajos previos solo utilizaron MAPE para medir la precisión de los métodos EAC. Además, las bases de datos utilizadas apenas superaban 90 proyectos en el mejor de los casos. En este estudio, no solo se considera los Errores Porcentuales Absolutos Medios (MAPE), sino también los Errores Cuadráticos Medios (MSE) y Errores Porcentuales Medios (MPE). Esto es importante ya que los MSE tienen a crecer exponencialmente cuando los errores se hacen grandes. Por otro lado, los MPE pueden adoptar valores negativos, es decir, pueden diferenciar qué métodos EAC sobreestiman o infraestiman la duración final del proyecto.

4. Métodos de investigación

En este estudio, la precisión de los métodos EAC se mide con los Errores Cuadráticos Medios (MSE), los Errores Porcentuales Medios (MPE) y los Errores Porcentuales Medios Absolutos (MAPE) a intervalos de seguimiento de 10% del progreso del proyecto.

Los valores de MSE y MAPE varían de 0 a + infinito. Para el caso de MPE, los resultados de precisión pueden oscilar matemáticamente entre - infinito y + infinito. No obstante, para las tres métricas de error (MSE, MPE y MAPE) un valor cercano a 0 significa que el método tiene mayor precisión (menor error). Adicionalmente, en el caso del MPE, si el resultado es negativo, significará que el método EAC infraestima la duración; mientras que si es positivo será que lo sobrestima.

4.1 Base de datos

La base de datos utilizada en este estudio se basa en un conjunto de redes aleatorias desarrollada por el Grupo de Investigación de Operaciones y Programación (OR&S) de la Universidad de Gante, Bélgica. La base de datos está compuesta con datos de 4100 proyectos artificiales generados por RanGen2. Este es un algoritmo propuesto por Demeulemeester et al. en 2003 y perfeccionado por Vanhoucke et al. en 2008. RanGen2 es un generador de redes aleatorias de actividades en el nodo. La base de datos completa está disponible en <https://www.projectmanagement.ugent.be/research/data> y ha sido utilizado en diferentes estudios comparativos de EVM (Vandevoorde y Vanhoucke, 2006; Colin y Vanhoucke, 2014).

Para determinar los valores simulados de la duración y costos de las actividades se ha utilizado la distribución Lognormal. Estudios previos señalan que la distribución de las duraciones y costos de las actividades de proyectos reales se asemejan a la distribución Lognormal (Trietsch et al., 2012). Adicionalmente, los valores de correlación duración-costo de las actividades también puede variar entre 0 y 1, lo cual significa entre ninguna correlación

(0) y correlación perfecta (1), respectivamente (Ballesteros-Pérez et al., 2020). Este estudio asume el valor de dicha correlación para cada actividad variará aleatoriamente según una distribución Uniforme entre 0.25 y 0.75. Adicionalmente, las 4100 actividades del proyecto están programadas para comenzar lo antes posible, es decir, programación ASAP.

4.2 Medición de la precisión de los métodos EAC

Los Errores Cuadráticos Promedio (*Mean Squared Errors*, MSE) permiten detectar desviaciones de las estimaciones del costo de los métodos EAC en cada periodo de seguimiento (AT) respecto del Costo real final del proyecto (RAC_{mk}). Concretamente, la estimación del costo en cada porcentaje de avance del proyecto se denomina EAC_{AT} y es calculado para cada uno de los 15 métodos de predicción. Por otro lado, RAC_{mk} equivale al costo real del proyecto generado artificialmente como suma de los costos de las actividades del proyecto para el proyecto m ($m = 1, 2 \dots M$ proyectos) y simulación k ($k = 1, 2 \dots K$ iteraciones para cada uno de los m proyectos). Concretamente, en nuestra investigación $M = 4100$ proyectos, $K = 100$ iteraciones y $AT = 10\%, 20\%, \dots 100\%$ de la Duración Real (RD_{mk}) del proyecto.

Particularmente, los MSE miden desviaciones cuadráticas promedio y, aunque sean siempre positivas, los MSE tienden a crecer más rápido que los MPE y los MAPE cuando aparecen desviaciones significativas (ya que estas desviaciones son más difíciles de diluir en los promedios de k y m). En nuestro contexto, la formulación adoptada para los MSE es la siguiente:

$$MSE_{AT} = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \left\{ \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \frac{(EAC_{AT} - RAC_{mk})^2}{(RAC_{mk})^2} \right\} \quad (1)$$

Nótese que el denominador también es cuadrático para evitar que las magnitudes resultantes tengan dimensión de tiempo y sean, por tanto, muy distintas (no homogéneas en orden de magnitud) para cada uno de los 4100 proyectos.

Los Errores Porcentuales Promedio (*Mean Percentage Errors*, MPE) también determinan la precisión del método analizado teniendo en cuenta el costo real previsto y el valor estimado del proyecto hasta AT. No obstante, tanto los MSE como los MAPE (detallados en tercer lugar) consideran únicamente variaciones positivas (MSE por ser cuadrático y MAPE por ser absoluto). Por tanto, la ventaja de los MPE es que permiten medir la sobrestimación (cuando $MPE > 0$) o infraestimación ($MPE < 0$) de los métodos EAC. La formulación del error MPE es la siguiente:

$$MPE_{AT} = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \left\{ \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \frac{EAC_{AT} - RAC_{mk}}{RAC_{mk}} \right\} \quad (2)$$

Por otra parte, los Errores Porcentuales Absolutos Promedio (*Mean Absolute Percentage Errors*, MAPE) tienen la ventaja de no compensar los errores de infraestimación con los de sobrestimación como sí puede ocurrir con los MPE. Es decir, en los MAPE, los errores siempre se acumulan sean en la dirección que sea. La formulación de los MAPE es la siguiente:

$$MAPE_{AT} = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \left\{ \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \frac{|EAC_{AT} - RAC_{mk}|}{RAC_{mk}} \right\} \quad (3)$$

5. Resultados

Los resultados de precisión de los 15 métodos EAC para los 4100 proyectos simulados 100 veces se muestran en la Figura 1. Recuérdese que valores cercanos a cero denotan mayor precisión. Y en el caso de los MPE, valores negativos denotan infraestimación mientras que valores positivos denotan sobrestimación.

Figura 1: Precisión de los métodos EAC calculada con MSE, MPE y MAPE

<i>Promedios MSEs</i>														
<i>AT (% RD)▶</i>			0%	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%	
ID	Método	EAC	0,02	0,27	0,21	0,14	0,09	0,05	0,03	0,02	0,01	0,00	0,00	Media
1	EVM	V1	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,008
2	EVM	V2	0,02	0,09	0,05	0,03	0,02	0,02	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,023
3	EVM	V3	0,02	0,38	0,36	0,25	0,14	0,07	0,04	0,02	0,01	0,00	0,00	0,125
4	EVM	V4	0,02	0,93	0,76	0,45	0,24	0,11	0,05	0,02	0,01	0,00	0,00	0,256
5	EVM	V5	0,02	0,07	0,04	0,03	0,02	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,020
6	EVM	ES1	0,02	0,12	0,11	0,08	0,06	0,04	0,03	0,01	0,01	0,00	0,00	0,046
7	EVM	ES2	0,02	0,39	0,25	0,16	0,10	0,06	0,03	0,02	0,01	0,00	0,00	0,102
8	EVM	ES3	0,02	0,07	0,04	0,03	0,02	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,020
9	EVM	SP1	0,02	0,97	0,83	0,53	0,32	0,19	0,11	0,06	0,03	0,01	0,00	0,307
10	ESM	ESM1	0,02	0,15	0,13	0,09	0,07	0,05	0,03	0,02	0,01	0,00	0,00	0,054
11	ESM	ESM2	0,02	0,10	0,06	0,04	0,02	0,02	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,026
12	ESM	ESM3	0,02	0,53	0,32	0,20	0,13	0,08	0,04	0,02	0,01	0,00	0,00	0,133
13	XSM	XSM1	0,02	0,06	0,07	0,06	0,05	0,03	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	0,032
14	XSM	XSM2	0,02	0,07	0,08	0,07	0,05	0,04	0,02	0,01	0,01	0,00	0,00	0,034
15	XSM	XSM3	0,02	0,12	0,10	0,07	0,06	0,04	0,03	0,02	0,01	0,00	0,00	0,044

<i>Promedios MPEs</i>														
<i>AT (% RD)▶</i>			0%	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%	
ID	Método	EAC	0,02	0,02	0,05	0,05	0,04	0,04	0,03	0,02	0,01	0,00	0,00	Media
1	EVM	V1	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,006
2	EVM	V2	0,02	-0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,002
3	EVM	V3	0,02	0,04	0,08	0,08	0,07	0,06	0,04	0,03	0,01	0,00	0,00	0,043
4	EVM	V4	0,02	0,05	0,09	0,09	0,07	0,06	0,04	0,02	0,01	0,00	0,00	0,044
5	EVM	V5	0,02	-0,03	-0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,001
6	EVM	ES1	0,02	0,03	0,06	0,07	0,06	0,05	0,04	0,03	0,02	0,01	0,00	0,037
7	EVM	ES2	0,02	0,03	0,07	0,07	0,06	0,05	0,04	0,03	0,02	0,01	0,00	0,037
8	EVM	ES3	0,02	-0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,000
9	EVM	SP1	0,02	0,04	0,09	0,10	0,10	0,09	0,07	0,06	0,04	0,01	-0,02	0,058
10	ESM	ESM1	0,02	0,09	0,10	0,09	0,08	0,06	0,05	0,03	0,02	0,01	0,00	0,054
11	ESM	ESM2	0,02	0,04	0,03	0,02	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,012
12	ESM	ESM3	0,02	0,15	0,13	0,11	0,09	0,07	0,05	0,03	0,02	0,01	0,00	0,065
13	XSM	XSM1	0,02	-0,01	0,02	0,04	0,04	0,04	0,03	0,02	0,01	0,00	0,00	0,020
14	XSM	XSM2	0,02	-0,01	0,03	0,05	0,05	0,05	0,04	0,03	0,02	0,01	0,00	0,026
15	XSM	XSM3	0,02	-0,04	-0,03	-0,03	-0,02	-0,02	-0,01	-0,01	-0,01	0,00	0,00	-0,018

<i>Promedios MAPEs</i>														
<i>AT (% RD)▶</i>			0%	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%	
ID	Método	EAC	0,12	0,25	0,21	0,17	0,14	0,12	0,09	0,07	0,05	0,03	0,00	Media
1	EVM	V1	0,12	0,11	0,10	0,09	0,08	0,07	0,06	0,05	0,03	0,02	0,00	0,059
2	EVM	V2	0,12	0,21	0,16	0,13	0,11	0,09	0,07	0,05	0,04	0,02	0,00	0,089
3	EVM	V3	0,12	0,24	0,22	0,19	0,15	0,12	0,09	0,07	0,04	0,02	0,00	0,114
4	EVM	V4	0,12	0,36	0,30	0,24	0,19	0,14	0,11	0,08	0,05	0,02	0,00	0,149
5	EVM	V5	0,12	0,19	0,15	0,13	0,10	0,08	0,07	0,05	0,04	0,02	0,00	0,084
6	EVM	ES1	0,12	0,23	0,20	0,17	0,14	0,11	0,09	0,07	0,05	0,02	0,00	0,108
7	EVM	ES2	0,12	0,35	0,27	0,22	0,17	0,14	0,10	0,08	0,05	0,02	0,00	0,140
8	EVM	ES3	0,12	0,19	0,15	0,12	0,10	0,08	0,07	0,05	0,04	0,02	0,00	0,083
9	EVM	SP1	0,12	0,39	0,34	0,29	0,25	0,21	0,18	0,15	0,11	0,07	0,03	0,202
10	ESM	ESM1	0,12	0,25	0,21	0,18	0,15	0,12	0,09	0,07	0,05	0,02	0,00	0,115
11	ESM	ESM2	0,12	0,22	0,17	0,14	0,11	0,09	0,07	0,05	0,04	0,02	0,00	0,092
12	ESM	ESM3	0,12	0,39	0,30	0,24	0,19	0,15	0,11	0,08	0,05	0,02	0,00	0,154
13	XSM	XSM1	0,12	0,16	0,16	0,14	0,13	0,10	0,08	0,06	0,04	0,02	0,00	0,091
14	XSM	XSM2	0,12	0,17	0,17	0,15	0,13	0,11	0,09	0,07	0,05	0,02	0,00	0,097
15	XSM	XSM3	0,12	0,25	0,22	0,19	0,16	0,13	0,10	0,08	0,05	0,03	0,00	0,121

Al observar la tabla superior de la Figura 1 se hace evidente que la mayoría de los métodos EAC calculados con Errores Cuadráticos Medios (MSE) logran una alta precisión a partir de dos tercios de avance del proyecto (sobre el 70% de ejecución) hacia adelante. Entre el 40% y el 70% solo algunos de los métodos (por filas) comienzan a ser precisos. Los métodos 1, 2, 5, 8, 11, 13 y 14 destacan entre los más precisos. Específicamente, el método 1 destaca como el método EAC con mayor precisión.

Los resultados de errores calculados con Errores Porcentuales Medios (MPE) son similares a los de los errores MSE, con la excepción de que algunos métodos logran tasas de error muy reducidas mucho antes que en el caso de los MSE. Concretamente, con esta métrica de error destacan los métodos 1, 2, 5, 8, 11, 13, 14 y 15, pero en esta ocasión es el método 8 el más preciso.

Finalmente, los errores de los métodos EAC calculados con Errores porcentuales Medios Absolutos (MAPE) alcanzan una alta precisión algo más tarde respecto de los MSE y MPE. No obstante, aproximadamente a partir del 70% la mayoría de los métodos también alcanzan valores de precisión aceptables. Los métodos 1, 2, 5, 8, 11, 13 y 14 son los más destacados, y el método 1 el mejor de todos (aunque no muy lejos del método 8).

Analizada la Figura 1, el resumen comparativo de los métodos EAC que han obtenido los mejores resultados de precisión se presenta en la Figura 2. En esta última figura se valoran cualitativamente los métodos por medio de “*”, es decir, cuantos más asteriscos, mejor se considera el método en cuanto a su precisión.

Figura 2: Resumen de la comparativa de precisión de los 15 métodos EAC

<i>Valores Medios (% RD)▶</i>			<i>Precisión</i>			<i>(Destacados)</i>			<i>Mejor</i>
ID	Método	EAC	MSE	MPE	MAPE	MSE	MPE	MAPE	
1	EVM	V1	0,008	0,006	0,059	***	*	***	***
2	EVM	V2	0,023	-0,002	0,089	*	*	*	*
3	EVM	V3	0,125	0,043	0,114				
4	EVM	V4	0,256	0,044	0,149				
5	EVM	V5	0,020	-0,001	0,084	**	**	**	**
6	EVM	ES1	0,046	0,037	0,108				
7	EVM	ES2	0,102	0,037	0,140				
8	EVM	ES3	0,020	0,000	0,083	**	***	**	***
9	EVM	SP1	0,307	0,058	0,202				
10	ESM	ESM1	0,054	0,054	0,115				
11	ESM	ESM2	0,026	0,012	0,092	*	*	*	*
12	ESM	ESM3	0,133	0,065	0,154				
13	XSM	XSM1	0,032	0,020	0,091	*	*	*	*
14	XSM	XSM2	0,034	0,026	0,097	*	*	*	*
15	XSM	XSM3	0,044	-0,018	0,121		*		

De la observación de la figura 2 se deriva que los métodos 1, 5 y 8 destacan en términos de precisión, seguidos de los métodos 2, 11 y 13. Muy cercanamente también lo sigue el método 14.

Los primeros cinco métodos utilizan un factor de rendimiento (PF) en su fórmula matemática. Concretamente, $PF=1$ en el método 1 y $PF=\alpha CPI+\beta SPI(t)$ en el método 8. Para los otros tres métodos: $PF=CPI$ (método 2); $PF=\alpha CPI+\beta SPI$ (método 5); y $PF=CPI(e)$ (método 11).

Curiosamente, el método 1 es matemáticamente el más sencillo de todos y el método 11 (que es prácticamente igual en precisión al método 1) también es bastante sencillo. Esto os hace

muy deseables para ser utilizados en la práctica frente a otros más complicados como los métodos del 13 al 14.

6. Discusión

Estudios previos sobre la precisión de métodos EAC en EVM como los indicados en la Tabla 2 señalan que los métodos con menores errores también proporcionan las señales de alerta más temprana (Batselier y Vanhoucke, 2015). Esto quiere decir que los mejores métodos de pronóstico del costo del proyecto también tienden a reducir sus errores mucho antes (en el tiempo) que los demás.

En este sentido, el estudio realizado por Zwikael et al. El año 2000 concluyó que la precisión de la estimación final de costes mejoraba significativamente una vez transcurrido el 60% de la duración del proyecto. Esa conclusión coincide aproximadamente con los resultados de nuestro estudio. Sin embargo, ni en el estudio de Zwikael et al., ni tampoco en los siguientes indicados en la Tabla 2 habían incluido muchos otros métodos EAC para poder generalizar esta afirmación. Tampoco, se habían utilizado MSE, MPE y MAPE para cuantificar las desviaciones de las predicciones del costo del proyecto bajo diferentes perspectivas. Esto implica que los resultados de la Figura 1 deberían ser bastante más representativos y generalizables que los de otros estudios previos sobre EVM.

Los resultados de la Figura 1 por tanto, permiten establecer que los métodos deterministas EAC con mayor grado de precisión son los métodos 1, 2, 5, 8, 11, 13 y 14. Y entre ellos, destacan los métodos 1 y 8. Creemos que estos resultados permitirán a los profesionales de proyectos tomar mejores decisiones en cuanto a qué métodos utilizar, especialmente teniendo en cuenta, por ejemplo, que el método 1 es el más sencillo (matemáticamente) de todos.

Por último, se plantea la duda de si, con un mejor afinamiento de los parámetros α y β del método 8 (que actualmente es el segundo mejor, pero únicamente de forma marginal respecto del método 1), sus resultados de precisión podrían haber superado a los de método 1. Sin embargo, también es evidente que no existe ninguna regla (publicada, al menos) para afinar estos parámetros en proyectos reales. Es decir, sus autores no propusieron ninguna regla para que, según determinadas características de los proyectos, los mejores valores de α y β pudieran conocerse antes de que el proyecto terminara. Esto podría suponer una línea de investigación complementaria de interés para algunos profesionales en dirección de proyectos.

7. Conclusión

El Análisis de Valor Ganado (*Earned Value Management*, EVM) es una de las técnicas deterministas que ha sido utilizada con mayor frecuencia por investigadores y profesionales en dirección de proyectos para predecir el costo y duración finales de proyectos. Desde sus inicios esta técnica ha recibido mucha atención particularmente sobre en cuanto a la precisión del índice de rendimiento del costo CPI (*Cost Performance Index*), dejando de lado otras muchas extensiones enfocadas a estimar la duración del proyecto, por ejemplo.

En este estudio se ha comparado la precisión de 15 métodos deterministas de pronóstico del costo o EAC (Estimated Cost At Completion) utilizados frecuentemente en EVM. La precisión de los métodos se midió con los Errores Cuadráticos Medios (MSE), los Errores Porcentuales Medios (MPE), y Errores Porcentuales Medios Absolutos (MAPEs). Esto a intervalos de seguimiento de 10% de la duración total del proyecto. Para eso, se utilizó un marco de cálculo que incluía 4100 proyectos artificiales con diversas estructuras topológicas, de los cuales se simuló su ejecución 100 veces.

Los resultados de este estudio evidencian que los proyectos logran una precisión destacada a partir del último tercio de ejecución del proyecto (aproximadamente a partir del 70% de avance de los proyectos). Adicionalmente, los métodos $EAC = AC + (BAC - EV)$ y $EAC = AC + (BAC - EV)/(\alpha CPI + \beta SPI(t))$ destacan entre los más precisos, también en etapas más tempranas (sobre el 40% de avance del proyecto).

Nuestro estudio también tiene limitaciones. Una de ellas tiene relación con la base de datos utilizada. Nuestro estudio se ha desarrollado con escenarios creados con proyectos simulados exclusivamente, es decir, no incluye proyectos reales. Otra segunda limitación es que los métodos comparados han sido exclusivamente deterministas, los cuales no son todos los que existen en EVM. Por tanto, futuras investigaciones podrían incluir métodos estocásticos y otro conjunto de proyectos reales para aumentar la representatividad de los resultados de precisión de los métodos EAC.

Referencias

- Anbari, F. (2003). Earned value project management method and extensions. *IEEE Engineering Management Review*, 32(3), 97–97. <https://doi.org/10.1109/EMR.2004.25113>
- Ballesteros-Pérez, P., Sanz-Ablanedo, E., Soetanto, R., González-Cruz, M. C., Larsen, G. D., & Cerezo-Narváez, A. (2020). 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)
- Barrientos-Orellana, A., Ballesteros-Pérez, P., Mora-Melià, D., González-Cruz, M. C., & Vanhoucke, M. (2022). Stability and accuracy of deterministic project duration forecasting methods in earned value management. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 29(3), 1449–1469. <https://doi.org/10.1108/ECAM-12-2020-1045>
- Batselier, J., & Vanhoucke, M. (2015). Empirical evaluation of earned value management forecasting accuracy for time and cost. *Journal of Construction Engineering and Management*, 141(11), 05015010. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0001008](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001008)
- Batselier, J., & Vanhoucke, M. (2017). Improving project forecast accuracy by integrating earned value management with exponential smoothing and reference class forecasting. *International Journal of Project Management*, 35(1), 28–43. <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2016.10.003>
- Christensen, D. S. (1999). Using the earned value cost management report to evaluate the contractor's estimate at completion. *Acquisition Review Quarterly*, 6(3), 283–296.
- Colin, J., & Vanhoucke, M. (2014). Setting tolerance limits for statistical project control using earned value management. *Omega*, 49, 107–122. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2014.06.001>
- Demeulemeester, E., Vanhoucke, M., & Herroelen, W. (2003). RanGen: A random network generator for activity-on-the-node networks. *Journal of Scheduling*, 6(1), 17–38. <https://doi.org/10.1023/A:1022283403119>
- Khamooshi, H., & Abdi, A. (2017). Project duration forecasting using earned duration management with exponential smoothing techniques. *Journal of Management in Engineering*, 33(1), 04016032. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)me.1943-5479.0000475](https://doi.org/10.1061/(asce)me.1943-5479.0000475)
- Lipke, W. (2003). Schedule is different. *The Measurable News*, 2(January), 31–34.
- Lipke, W. (2012). Schedule adherence and rework. *CrossTalk*, 25(6), 4–8.
- Trietsch, D., Mazmanyán, L., Gevorgyan, L., & Baker, K. R. (2012). Modeling activity times by the Parkinson distribution with a lognormal core: Theory and validation. *European Journal of Operational Research*, 216(2), 386–396. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2011.07.054>

- Vandevoorde, S., & Vanhoucke, M. (2006). A comparison of different project duration forecasting methods using earned value metrics. *International Journal of Project Management*, 24(4), 289–302. <https://doi.org/10.1016/J.IJPROMAN.2005.10.004>
- Vanhoucke, M., Coelho, J., Debels, D., Maenhout, B., & Tavares, L. V. (2008). An evaluation of the adequacy of project network generators with systematically sampled networks. *European Journal of Operational Research*, 187(2), 511–524. <https://doi.org/10.1016/J.EJOR.2007.03.032>
- Wauters, M., & Vanhoucke, M. (2015). Study of the stability of earned value management forecasting. *Journal of Construction Engineering and Management*, 141(4). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0000947](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000947)
- Wauters, M., & Vanhoucke, M. (2017). A nearest neighbour extension to project duration forecasting with artificial intelligence. *European Journal of Operational Research*, 259(3), 1097–1111. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2016.11.018>
- Zwikael, O., Globerson, S., & Raz, T. (2000). Evaluation of models for forecasting the final cost of a project. *Project Management Journal*, 31(1), 53–57. <https://doi.org/10.1177/875697280003100108>

