

**ENTROPÍA COMO ÍNDICE DE GESTIÓN PARA
PROYECTOS DE CONSTRUCCIÓN**

DIANA MARCELA FRANCO DURAN

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL**

MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL

BUCARAMANGA

2016

**ENTROPÍA COMO ÍNDICE DE GESTIÓN PARA
PROYECTOS DE CONSTRUCCIÓN**

DIANA MARCELA FRANCO DURAN

Trabajo de Grado para optar al título:
MAGISTER EN INGENIERÍA CIVIL

Director:
GUILLERMO MEJÍA AGUILAR
PhD. Ingeniería de la Construcción

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA**

2016

“La disciplina es el mejor amigo del hombre, porque ella le lleva a realizar los
anhelos más profundos de su corazón”

–***Teresa de Calcuta***

"Lo que hagas será más importante que lo que logres. Y cómo te sientas por ello, será
aún más importante que lo que hayas hecho."

– ***Jerry Gilles***

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN.....	15
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	17
2. OBJETIVOS DEL ESTUDIO.....	19
2.1 OBJETIVO GENERAL.....	19
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	19
2.3 ALCANCE	20
3. MARCO TEÓRICO	20
3.1 MÉTODOS DE PRONÓSTICOS COMO HERRAMIENTAS DE CONTROL.....	20
3.2 EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE LOS MÉTODOS DE PRONÓSTICO	21
3.2.1 Índices de Precisión	21
3.2.2 Índice de Anticipación	22
3.3 ENTROPÍA DE LA INFORMACIÓN.....	23
3.3.1 Cantidad de Información	24
4. METODOLOGÍA	26
4.1 DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN Y MUESTRA	26
4.2 VARIABLES.....	27

4.2.1 Variables Principales	28
4.2.2 Índices.....	29
5.1 CARACTERÍSTICAS DE LAS VARIABLES E ÍNDICES.....	31
5.1.1 Variables Principales	31
5.1.2 Índice de Cantidad de Información	37
5.1.3 Índices de Precisión	38
5.1.4 Índice de Anticipación	39
5.2 GRÁFICOS DE DISPERSIÓN: CORRELACIÓN	41
5.3 GRÁFICO <i>IFFE</i> VS PROBABILIDAD	43
5.4 GESTIÓN DE LA INCERTIDUMBRE DEL PROYECTO.....	48
5.5 CAPACIDAD DE CLASIFICACIÓN DE LOS ÍNDICES	51
5.5.1 Análisis de Proporciones.....	52
6. CONCLUSIONES	53
6.1 ÍNDICE CANTIDAD DE INFORMACIÓN.....	54
6.2 VENTAJAS DEL ÍNDICE DE CANTIDAD DE INFORMACIÓN.....	55
6.3 ÍNDICES TRADICIONALES DE DESEMPEÑO	55
6.4 LIMITACIONES DEL ESTUDIO E INVESTIGACIÓN FUTURA.....	56
REFERENCIAS	59

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Revisión preliminar de artículos publicados sobre desviaciones en costo en proyectos de Ingeniería y Construcción alrededor del mundo.	17
Figura 2. Revisión preliminar de artículos publicados sobre factores asociados a las desviaciones en costo en proyectos de Ingeniería y Construcción.	18
Figura 3. Relación, información, incertidumbre y probabilidad de ocurrencia de un evento.	25
Figura 4. Error del método de pronóstico en diferentes puntos de ejecución del proyecto.	28
Figura 5. Gráfica $I(\text{FFE})$ vs $P(\text{FFE}_i)$.	30
Figura 6. Histogramas del FCD y FFE de los proyectos.	32
Figura 7. Histogramas del FCD y FFE de los proyectos over-budget.	35
Figura 8. Histogramas del FCD y FFE de los proyectos under-budget.	36
Figura 9. Distribución de probabilidad la FCD al 75% de los proyectos under y over-budget.	36
Figura 10. Histogramas del TI de los proyectos a) over-budget y b) under-budget.	39
Figura 11. Métodos de pronóstico con TI menores y mayores a 0.45.	40
Figura 12. Gráficos de dispersión: $I(\text{FFE})$ vs índices de desviación (FCD , FFE) para proyectos over y under-budget.	41
Figura 13. Gráficos de dispersión $I(\text{FFE})$ vs % Error para proyectos over-budget y under-budget.	42
Figura 14. Gráficos de dispersión: $I(\text{FFE})$ vs TI para proyectos over-budget y under-budget.	42
Figura 15. Gráfica $I(\text{FFE})$ vs Probabilidad para toda la muestra del estudio over-budget y under-budget.	43
Figura 16. Gráfica $I(\text{FFE})$ vs $P(\text{FFE} \leq \text{FFE}_i)$	44
Figura 17. Gráfica $I(\text{FFE})$ vs $P(\text{FFE} \leq \text{FFE}_i)$	44
Figura 18. $I(\text{FFE})$ en cada punto de análisis para el P17 y P06.	45
Figura 19. $I(\text{FFE})$ para proyectos con igual FCD – Proyectos Over-budget.	46

Figura 20. IFFE para proyectos con igual <i>TI</i> .	46
Figura 21. Ordenamiento por cuartiles de la <i>FCD</i> y el <i>TI</i> , al considerar el I(FFE) como criterio para medir el desempeño de los métodos de pronóstico.	47
Figura 22. Manejo de la incertidumbre del Proyecto 40.	48
Figura 23. Manejo de la incertidumbre del Proyecto 17.	49
Figura 24. Manejo de la incertidumbre del Proyecto 16 y 45.	49
Figura 25. Manejo de la incertidumbre del Proyecto 146 y 118.	51
Figura 26. Ordenamiento asignado por el I(FFE) con respecto a los demás índices para los proyectos over-budget y under-budget.	53

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Información General de los Proyectos.	27
Tabla 2. Cálculo del índice de anticipación de acuerdo al tipo de proyecto.	31
Tabla 3. Estadística descriptiva del <i>FCD</i> y <i>FFE</i> al 0% de ejecución del proyecto.	32
Tabla 4. Estadística descriptiva del <i>FFE</i> .	33
Tabla 5. Parámetros de la distribución del <i>FFE</i> para los proyectos over-budget.	34
Tabla 6. Parámetros de la distribución del <i>FFE</i> para los proyectos under-budget.	35
Tabla 7. Estadística descriptiva del $I(FFE)$.	37
Tabla 8. Estadística descriptiva de los errores porcentuales.	38
Tabla 9. Estadística descriptiva del <i>TI</i> .	39
Tabla 10. Correlación (R^2) entre el $I(FFE)$ y los errores porcentuales.	42
Tabla 11. Índices de los Proyectos 33, 40 y 73.	44
Tabla 12. Índices de los Proyectos 33, 40 y 73.	44
Tabla 13. Índices de los Proyectos 6, 17, 14 y 52.	45

RESUMEN

TITULO: ENTROPÍA COMO ÍNDICE DE GESTIÓN PARA PROYECTOS DE CONSTRUCCIÓN

AUTOR: DIANA MARCELA FRANCO DURAN*

PALABRAS CLAVES: DESVIACIÓN EN COSTO, DESEMPEÑO MÉTODOS DE PRONÓSTICO, ENTROPÍA, INFORMACIÓN, INCERTIDUMBRE.

DESCRIPCIÓN:

Los métodos de pronóstico, como herramienta de control de los proyectos, pretenden alertar oportunamente a los gerentes sobre las posibles desviaciones en costo del proyecto. Sin embargo, los recurrentes sobrecostos en la industria de la construcción han resaltado la importancia de evaluar el desempeño de estos métodos en miras a mejorar sus estimaciones. Para tal fin, resulta importante considerar, que cualquier pronóstico por bueno que sea (preciso y oportuno) siempre estará sujeto cierta variabilidad. La falta de información que se tiene sobre los eventos futuros (incertidumbre) conlleva a que los métodos no puedan predecir con total exactitud o certeza el costo final del proyecto. Por lo tanto, con el propósito de mejorar el desempeño de los métodos de pronóstico, es necesario cuantificar la incertidumbre de sus estimaciones ya que esta puede afectar drásticamente el costo, la calidad y la duración del proyecto. Este estudio propone un índice, basado en el concepto de entropía de la información, que mide la incertidumbre de las desviaciones en costo de los métodos de pronóstico utilizados en los proyectos de construcción. Los resultados indican que resulta objetivo medir el desempeño de los métodos de pronóstico a partir del $I(\overline{FFE})$ porque no solo proporciona información sobre la incertidumbre de las estimaciones de los métodos sino que además tiene en cuenta la precisión y la anticipación de los métodos.

* Trabajo de Grado

Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas, Escuela de Ingeniería Civil, Maestría en Ingeniería Civil,
Director: Guillermo Mejía Aguilar, PhD Ingeniería de la Construcción

ABSTRACT

TITLE: SHANNON'S ENTROPY APPROACH FOR ASSESSING UNCERTAINTY OF COST FORECASTS IN CONSTRUCTION PROJECTS

AUTHOR: DIANA MARCELA FRANCO DURAN[†]

KEYWORDS: COST DEVIATION, ENTROPY, FORECASTING PERFORMANCE, INFORMATION, UNCERTAINTY.

DESCRIPTION:

Several studies have shown that cost overrun is a frequent and worldwide problem within the construction industry. Analysis of these common deviations and their causes highlights the need to assess the performance of control systems and their forecasting methods. Even when a forecast meets accuracy and timeliness criteria, some variability is inherent within it. Uncertainty is another criterion used to assess forecasting performance, nevertheless, in construction there is very little literature upon uncertainty quantification in project management. Prior research on uncertainty has mainly focused on the identification of risk factors leading to cost overruns rather than on the quantification of cost forecast uncertainty. This study proposes an index, based on entropy of information, which measures the uncertainty of cost forecasts in construction projects. The sample included data from 112 construction projects, which were split into over-budget and under-budget projects for statistical analysis. Uncertainty was predicted by the amount of information provided by the occurrence of unfavorable forecast errors of project cost. A lower index will predict a lower uncertainty of forecast errors and better forecasting performance. This new index will help project managers select the most reliable method to estimate the project final cost, which in turn will drive them to take effective corrective or preventive actions in support of project goals

[†] Master Thesis

Faculty of Physical-mechanical Engineering, Civil Engineering Department, Master of Science in Civil Engineering, Advisor: Guillermo Mejía Aguilar, PhD Construction Engineering

INTRODUCCIÓN

En la industria de la construcción, obedeciendo a un enfoque determinista, frecuentemente se describe el costo final del proyecto como un valor fijo. Sin embargo, los proyectos dependen de factores internos y/o externos que afectan su desempeño (Bennett & Ormerod, 1984) y le imprimen a los costos la cualidad de variabilidad. La falta de información sobre estos factores hace que no sea posible predecir con alto grado de certeza el costo final del proyecto, e incide en un mejor control del mismo.

Los sistemas de control de costos utilizan herramientas de monitoreo que permiten identificar posibles desviaciones y formular medidas correctivas para ajustar el desempeño actual del proyecto al estimado inicialmente. Una de las técnicas más conocidas es el método de valor ganado, conocido por sus siglas en inglés *EVM* (Earn Value Method). Recientemente, los métodos de pronóstico han empezado a tomar importancia dentro de los sistemas de control; ya que proporcionan alertas tempranas a los gerentes sobre posibles desviaciones en costo del proyecto (Mohd Nasira & Abd. Majid, 2006).

Aunque el propósito de estos métodos es alertar oportunamente sobre estas desviaciones para corregirlas a tiempo, varios estudios manifiestan que el sobrecosto es un problema recurrente en la industria de la construcción (Narbaev & De Marco 2014; Shehu et al 2014; Cheng, 2014, Rahman, Memon, & Abd Karim, 2013; Love et al 2013; Odeck 2004; Bushuyev & Sochnev, 1999). Razón por la cual se hace necesario evaluar el desempeño de los métodos de pronóstico dentro del proceso de control de los proyectos. Varios autores coinciden en que un buen método de predicción debe ser, entre otros, oportuno, preciso, estable, imparcial y confiable (Mohd Nasira & Abd. Majid, 2006; Al-Jibouri, 2003; Teicholz, 1993). Por ello, la incertidumbre debe considerarse como un criterio adicional para medir el desempeño de los métodos de pronóstico, y además, debe integrarse al proceso de gestión de costos de los proyectos (Bennett & Ormerod, 1984).

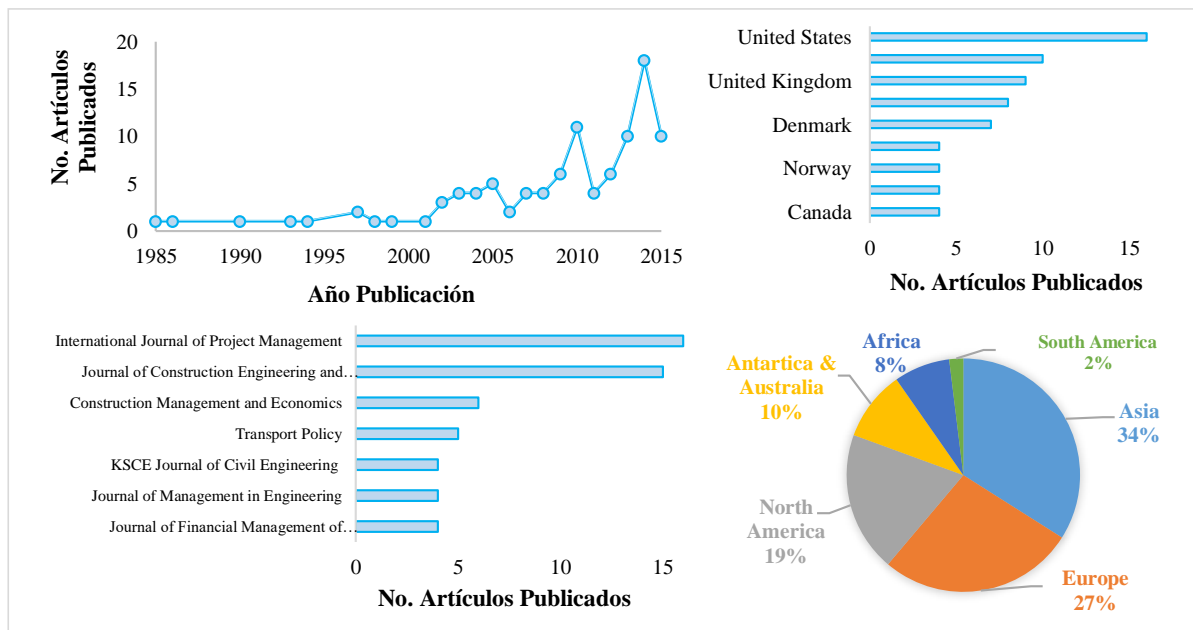
En algunas disciplinas, el estudio de la incertidumbre de los proyectos se ha centrado principalmente en la identificación de factores de riesgo asociados a los sobrecostos y muy poco en la cuantificación de la incertidumbre asociada a la estimación de costos del proyecto (Asllani & Etkin, 2007). Este estudio pretende suplir esta necesidad, proponiendo un índice basado en el concepto de entropía de

la información que cuantifica la incertidumbre de las estimaciones de costos, a partir de la cantidad de información que comunica la ocurrencia de desviaciones no favorables. Así, se proporciona una visión más completa del desempeño de los métodos de pronóstico que permite una mejor toma de acciones correctivas o preventivas para cumplir con los objetivos del proyecto.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Uno de los principales objetivos de las empresas de construcción es terminar sus proyectos dentro del costo presupuestado. Sin embargo, el sobrecosto es un problema mundial, frecuente en la industria de la construcción, que afecta a varios tipos de proyectos y que ha estado presente a lo largo de los años (Cheng, 2014; Rajan, Gopinath & Behera, 2014; Shehu, Endut, Akintola, & Holt, 2014; Alinaitwe, Apolot & Tindiwensi, 2013; Ahsan & Gunawan, 2010). Una revisión preliminar en 7 bases de datos, en la que se identificaron 104 artículos que reportaban desviaciones en costo, tanto en proyectos de ingeniería como de construcción, permitió corroborar estas afirmaciones. Los resultados se muestran en la Figura 1.

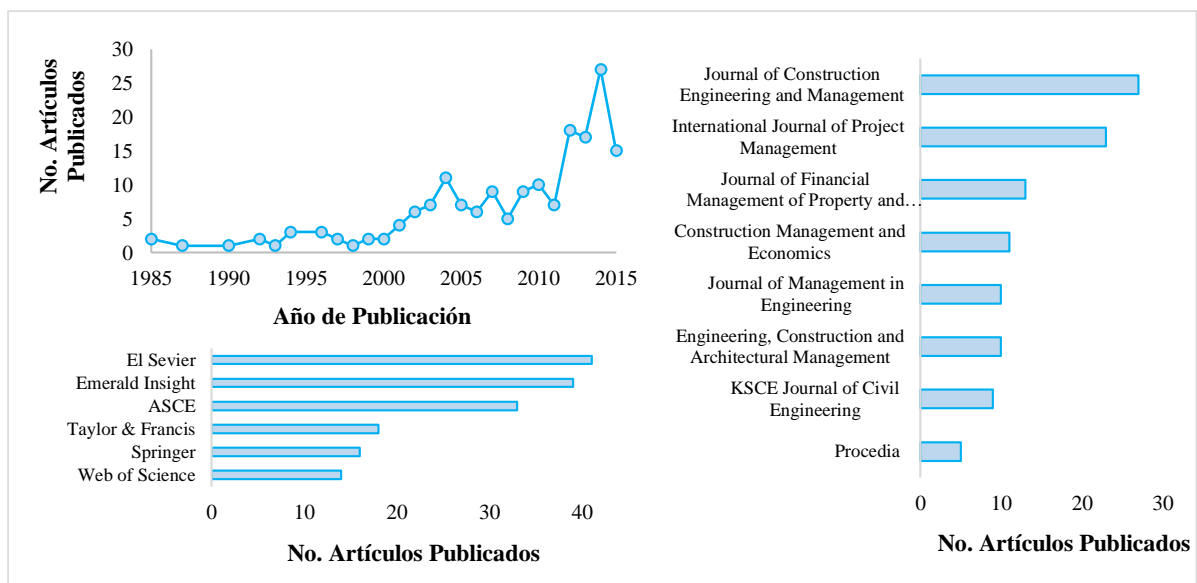
Figura 1. Revisión preliminar de artículos publicados sobre desviaciones en costo en proyectos de Ingeniería y Construcción alrededor del mundo ($N=104$).



Esta revisión también permitió identificar, en 13 bases de datos, 181 artículos relacionados con los factores que conllevan a las desviaciones en costo de los proyectos. Los resultados indican que este tema ha sido extensamente estudiado a lo largo de los años, y que al igual que el tema de desviaciones en costo, se ha incrementado significativamente su interés en los últimos 10 años (ver Figura 2).

Algunas de las causas asociadas a los sobrecostos identificadas en esta revisión fueron: deficiencias en los sistemas de control (Cheng, 2014; Mohd Nasira & Abd. Majid, 2006), falta de planeación, monitoreo y control en los proyectos (Rajan, Gopinath & Behera, 2014; Rahman, Memon, & Abd Karim, 2013), imprecisión y falta de confiabilidad de las estimaciones de costos (Rahman; Memon & Abd Karim, 2013; Khamooshi & Cioffi, 2013), y discrepancias en la información de construcción (Doloi, 2013).

Figura 2. Revisión preliminar de artículos publicados sobre factores asociados a las desviaciones en costo en proyectos de Ingeniería y Construcción ($N=181$).



Estos reiterados sobrecostos en los proyectos y sus causas asociadas, resaltan la importancia de evaluar el desempeño de los sistemas de control; ya que éstos permiten mitigar o evitar desviaciones críticas en los proyectos (Al-Jibouri, 2003). Estos sistemas regularmente actualizan el costo final del proyecto utilizando métodos de pronóstico (Batselier & Vanhoucke, 2015; Kim & Reinschmidt, 2011; Hamilton, 2004). Por tanto, un sistema de control de costos eficiente debe incluir un método de pronóstico que proporcione información precisa y oportuna sobre los resultados finales del proyecto (Grau, Back, Abbaszadegan, & Sirven, 2014).

Bajo esa perspectiva, se han propuesto diversos índices para evaluar el desempeño de los métodos de pronóstico, siendo el más común la precisión, y recientemente,

la anticipación. Sin embargo, la naturaleza de estos índices no permite comparar el desempeño de los métodos utilizando estos dos criterios de manera separada. La precisión de un método de pronóstico no necesariamente da cuenta sobre su anticipación (Kim, 2007). Adicionalmente, los índices propuestos para medir la anticipación y precisión de los métodos de pronóstico de manera simultánea proporcionan más información sobre la precisión que sobre la anticipación del método (Mejía & Franco, 2015).

Dada la trascendencia que tienen los métodos de pronóstico en el cumplimiento de los objetivos del proyecto, existe la necesidad de una medida, sencilla y flexible, que proporcione mayor información sobre el desempeño de los métodos, y por ende del desempeño del sistema de control y del proyecto. Para tal fin, resulta importante considerar, que cualquier pronóstico por bueno que sea (preciso y oportuno) siempre estará sujeto cierta variabilidad. La falta de información que se tiene sobre los eventos futuros (incertidumbre) conlleva a que los métodos no puedan predecir con total exactitud o certeza el costo final del proyecto. Por lo tanto, con el propósito de mejorar el desempeño de los métodos de pronóstico, es necesario cuantificar la incertidumbre de sus estimaciones (Asllani & Etkin, 2007); ya que esta puede afectar drásticamente el costo, la calidad y la duración del proyecto.

2. OBJETIVOS DEL ESTUDIO

2.1 OBJETIVO GENERAL

Proponer y evaluar un índice, basado en el concepto de entropía de la información, que mida la incertidumbre de las desviaciones en costo de los métodos de pronóstico utilizados en los proyectos de construcción.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Definir y calcular un índice, basado en el concepto de entropía de la información, para cuantificar la incertidumbre de las desviaciones en costo de los métodos de pronóstico.

- Comparar el nuevo índice con índices de precisión de los métodos de pronóstico de los proyectos de construcción.
- Comparar el nuevo índice con el índice de anticipación de los métodos de pronóstico de los proyectos de construcción.

2.3 ALCANCE

El alcance de los objetivos anteriormente descritos, se enmarca dentro de las siguientes consideraciones:

- Se analizará el desempeño de los métodos de pronóstico de los proyectos en relación a la incertidumbre asociada a sus estimaciones del costo final del proyecto, sin considerar el tipo de método utilizado.
- Los proyectos a analizar corresponden a la base de datos con la que cuenta el grupo de investigación, los cuales fueron ejecutados en Estados Unidos.
- Se analizarán proyectos con desviaciones menores o iguales al 100% e índices de anticipación menores o iguales a 1. Se descartaron proyectos con desviaciones iguales al 0%.
- Los índices de precisión y anticipación calculados, corresponden a aquellos propuestos en la literatura especializada para los métodos de pronóstico de los sistemas de control de los proyectos de construcción.
- El nuevo índice, basado en el concepto de entropía, se calculará, en diferentes puntos de avance del proyecto: 0%, 25%, 50% y 75%, a partir de la cantidad de información que proporciona la ocurrencia de desviaciones no favorables. El valor de la cantidad de información obtenida se asociará al grado de incertidumbre de la variable aleatoria.

3. MARCO TEÓRICO

3.1 MÉTODOS DE PRONÓSTICOS COMO HERRAMIENTAS DE CONTROL

La técnica de valor ganado (*EVM*) es un método cuantitativo que mide y comunica el avance y desempeño del proyecto, integrando tres elementos importantes de la

gestión: alcance, tiempo y costo (Hazir, 2014; Pajares & Lopez-Paredes, 2011; Vandevoorde & Vanhoucke, 2006). En sus primeras etapas de investigación, los estudios sobre el *EVM* se centraron en su precisión. Recientemente, estos se han centrado en identificar sus limitaciones y las causas de sus desviaciones, para predecir los impactos y determinar los riesgos que estas variaciones podrían generar sobre el proyecto (Vanhoucke, 2009). A pesar de su frecuente uso en el control de proyectos de construcción, la implementación del *EVM* ha sido cuestionada por varios autores; ya que esta metodología genera estimaciones demasiado optimistas e imprecisas (Kim, Wells & Duffy, 2003).

Estas inconsistencias, junto con la necesidad de estimar el costo final del proyecto tan pronto como sea posible, han llevado a estudiar y considerar a los métodos de pronósticos como una herramienta útil de los sistemas de control. Sin embargo, algunos estudios han encontrado, que en la industria no existe una guía estándar para la utilización de estos métodos y que su integración con los demás procesos de gestión es muy limitada (CII, 2009). El uso inadecuado de los métodos de pronóstico como herramientas de control para la evaluación del desempeño del proyecto pone en riesgo la efectividad de los procesos de toma de decisiones.

3.2 EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE LOS MÉTODOS DE PRONÓSTICO

En la literatura especializada existe una gran variedad de índices propuestos para evaluar el desempeño de los métodos de pronóstico. Sin duda, la precisión ha sido uno de los criterios que más ha prevalecido en cualquier sistema de medición (Barraza, Back & Mata, 2004; Chan, Scott & Lam, 2002). No obstante, en los últimos años, algunos investigadores se han centrado en resaltar y proponer a la anticipación como un criterio adicional para medir el desempeño de los métodos, lo que permite una toma de acciones correctivas oportuna que conduzcan al logro de los objetivos del proyecto.

3.2.1 Índices de Precisión

En términos generales existen 4 tipos de medidas de precisión de los métodos de pronósticos: 1) con escala dependiente, 2) como porcentaje del error, 3) como error relativo y 4) como error sin escala (Hyndman R. J., 2006). Según Collopy &

Armstrong (2000), la selección de alguna de ellas influye a la hora de determinar, cuál método de pronóstico es más preciso.

Las medidas de error con escala dependiente se fundamentan en el error absoluto o el error al cuadrado (Hyndman R. J., 2006). Este error se calcula como la diferencia entre el valor real y el valor estimado (De Gooijer & Hyndman, 2006). Entre ellas se encuentran: el error absoluto medio (*MAE*), conocido también como la desviación absoluta media (*MAD*), el error geométrico absoluto medio (*GMAE*) y el error cuadrático medio (*MSE*). Dado que todas estas medidas tienen la misma escala de los datos, según Hyndman R. J (2006), resultan poco apropiadas para evaluar la precisión de los métodos de pronóstico a lo largo de múltiples series de datos.

Las medidas expresadas como porcentaje de error permiten comparar el desempeño de los métodos de pronóstico entre diferentes series de datos. La más conocida es el porcentaje de error medio absoluto (*MAPE*). A pesar de su frecuente uso, esta medida arroja valores indefinidos e infinitos cuando la serie toma valores de cero, por tal razón se ha propuesto el error medio absoluto simétrico (*sMAPE*) como otra medida de porcentaje de error (De Gooijer & Hyndman, 2006; Hyndman R. J., 2006).

Las medidas expresadas como error relativo dividen cada error en el error obtenido utilizando algún método de pronóstico, generalmente se utiliza el método *naïve*, en el cual el valor del pronóstico para cada periodo futuro corresponde al valor real para ese periodo. Las medidas más conocidas son el error absoluto relativo medio (*MdRAE*) y el error absoluto relativo medio geométrico (*GMRAE*). Finalmente, dentro de las medidas de error sin escala, el error absoluto medio escalado (*MASE*) ha resultado apropiado para evaluar los diferentes métodos de pronóstico y no arroja valores infinitos ni indefinidos (Hyndman R. J., 2006).

3.2.2 Índice de Anticipación

La anticipación es entendida como el momento en el cual un método de pronóstico empieza a predecir desviaciones significativas en costo a lo largo de la ejecución del proyecto. Uno de los primeros autores en definir este índice para los métodos de pronóstico fue Teicholz (1993), quien lo representó como el área comprendida

entre las curvas del costo final pronosticado a lo largo de la ejecución del proyecto y su costo final. En su estudio, la anticipación fue medida durante el 50% de avance del proyecto; ya que durante esta etapa, al identificar alertas sobre posibles sobrecostos se pueden tomar medidas correctivas a tiempo. Posteriormente, Kim (2007) se refirió a la anticipación como un punto de alerta de sobrecostos, definiéndola como el momento en el cual una señal de alerta, sobre posibles sobrecostos, es obtenida a partir del uso de métodos probabilísticos de pronóstico. Recientemente, Grau & Back (2015) definieron este índice como el error normal de la anticipación. Aunque su denominación es diferente, este índice se calcula como el área bajo la curva entre los valores pronosticados y el valor final del proyecto.

3.3 ENTROPÍA DE LA INFORMACIÓN

Shannon (1948) definió la entropía de la información como un medio para cuantificar la incertidumbre asociada a la predicción de los resultados de un experimento aleatorio. Esta incertidumbre se mide en términos de la cantidad de información que proporciona la observación del resultado de una variable aleatoria X (Ogunnaike, 2010). Dado que la entropía es una función que asume siempre valores positivos, en la literatura especializada se ha considerado como un criterio objetivo para medir la cantidad de información que comunica cualquier proceso aleatorio (Ozkul, Harmancioglu & Singh, 2000).

Bushuyev & Sochnev (1999) fue uno de los primeros autores en introducir el concepto de entropía de la información como herramienta de control para los proyectos. En su estudio, el autor midió la incertidumbre de la programación del proyecto, considerando a la duración de las actividades como una variable aleatoria y definiendo una serie de eventos no favorables. Asllani & Etkin (2007) cuantificaron la incertidumbre de un proyecto de manufactura a partir de sus factores de riesgo e importancia relativa, demostrando que el concepto de entropía puede ser utilizado como una herramienta propicia para medir la incertidumbre del proyecto. Por su parte, Isik (2010) aplicó el concepto de entropía para medir la complejidad de un sistema de cadena de suministro. Para el autor, la entropía representa la cantidad de información que se requiere para caracterizar el estado de un sistema durante un período de tiempo determinado. Esta complejidad se calculó considerando a la desviación entre el valor pronosticado de la demanda y el valor real de la orden como una variable aleatoria.

Aunque la entropía de la información es considerada como uno de los posibles enfoques alternativos a la gestión del riesgo y al control de proyectos, en el área de gestión de la construcción este concepto no se ha aplicado de forma sistemática (Christodoulou, Ellinas, & Aslani, 2009). La mayoría de los estudios han aplicado este concepto como: 1) un medio para identificar los factores de riesgo del proyecto y medir el riesgo total del proyecto (Xiao-mei & Xiao-jun, 2011); 2) una herramienta de optimización para la asignación y programación de recursos limitados (Christodoulou, de Ellinas & la Aslani, 2009); 3) una herramienta para medir el grado de diversificación y/o concentración de las empresas de construcción (Choi & Russell, 2005); 4) una herramienta de apoyo a la toma de decisiones bajo ambientes de incertidumbre, aplicada en conjunto con la teoría difusa en problemas relacionados a la toma de decisiones de los procesos de gestión financiera de los proyectos (Tang, Leung & Lam, 2006); y 5) como herramienta de alerta temprana con análisis discriminantes para predecir dificultades financieras en las empresas de construcción (Bal, Cheung & Wu, 2013).

3.3.1 Cantidad de Información

De acuerdo a lo expuesto por Shannon (1948), la entropía de la información $H(X)$ mide la incertidumbre promedio de una variable aleatoria a partir de la cantidad de información que proporciona la ocurrencia de un evento. En la Ecuación 1, X es una variable aleatoria con n resultados $(x_1, \dots, x_i, \dots, x_n)$ y $p(x_i)$ es la probabilidad de ocurrencia de un evento x_i .

$$H(X) = - \sum_{i=1}^n p(x_i) \log_2 p(x_i) \quad (1)$$

The diagram shows the formula $H(X) = - \sum_{i=1}^n p(x_i) \log_2 p(x_i)$ with several annotations:

- A green bracket above the summation symbol is labeled "Incertidumbre Promedio".
- A blue arrow points from the $\log_2 p(x_i)$ term to the text "Cantidad de Información".
- A red arrow points from the $p(x_i)$ term to the text "Probabilidad de ocurrencia E".
- A red arrow points from the x_i term (implied by the context) to the text "Variable Aleatoria".

El concepto de entropía es también considerado como una medida de información y bajo esa perspectiva, Shannon (1948) definió $I(X)$ como la cantidad de información necesaria para describir a una variable aleatoria X , o como la cantidad de información que comunica la variable, calculada a partir de la probabilidad de

ocurrencia de un evento (ver Ecuación 2). Dado que $I(X)$ mide indirectamente la incertidumbre de la variable aleatoria, si la información está completa, no hay incertidumbre y si hace falta información, hay incertidumbre (Singh, 2014).

$$I(X) = \log_2 \frac{1}{P(X)} \quad (2)$$

Para entender mejor este concepto resulta apropiado traer a colación el siguiente ejemplo. Los sucesos inesperados son aquellos que más impresionan a las personas; cuanto menos esperado sea, mayor será el grado de sorpresa. Este grado de sorpresa se puede cuantificar a partir de la probabilidad de ocurrencia del suceso. Cuanto más probable sea la ocurrencia del evento, menor será la sorpresa que cause su conocimiento si este realmente ocurre; ya que este suceso pudo haberse anticipado, a priori, con un alto grado de certeza. Similarmente, cuanto menos probable sea la ocurrencia de un suceso, mayor será el grado de sorpresa que cause, si este realmente ocurre (ver Figura 3).

Figura 3. Relación, información, incertidumbre y probabilidad de ocurrencia de un evento.



En términos técnicos, si la probabilidad de ocurrencia de un evento $P(X = x_i)$ es relativamente alta, esta observación no proporciona información relevante; ya que este resultado podría haberse deducido con alto grado de certidumbre antes de realizar el experimento. Por el contrario, si $P(X = x_i)$ es relativamente baja, si este evento realmente ocurre, su observación proporciona mayor información; ya que antes de realizar el experimento, este resultado no podría haberse anticipado. Es decir, que la cantidad de información que proporciona la ocurrencia de un evento es función del inverso de su probabilidad (ver Ecuación 2). En otras palabras, el alto grado de incertidumbre asociado a la probabilidad de ocurrencia de un evento, a priori, hace que la observación real del evento (en la experimentación) sea muy

informativa (Ogunnaike, 2010). En este estudio se utiliza el concepto de cantidad de información para cuantificar la incertidumbre de las estimaciones en costo de los métodos de pronóstico utilizados en los proyectos de construcción.

4. METODOLOGÍA

4.1 DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN Y MUESTRA

Este estudio utilizó un diseño de investigación transversal, con análisis descriptivos, correlacionales y no paramétricos. A partir del componente descriptivo se analizaron las características de cada una de las variables del estudio y a partir del componente correlacional se describió, midió y explicó el grado de asociación existente entre las variables. El análisis no paramétrico permitió medir la capacidad de clasificación que tienen los índices de desempeño de los métodos de pronóstico analizados en este trabajo de investigación y permitió además, determinar si existe alguna diferencia entre ellos. Todas las pruebas estadísticas se evaluaron en un nivel de significancia $\alpha = 0.05$ y para dichos análisis se utilizaron los programas SPSS™ versión 21 y Minitab v17.

La unidad de análisis fue el proyecto, específicamente proyectos de construcción, finalizados, independientes y ejecutados por diferentes empresas en Estados Unidos. La información recopilada de cada uno de los proyectos corresponde a los valores históricos y cuantitativos del costo final pronosticado a lo largo del periodo de ejecución del mismo. El costo final estimado incluye la asignación para imprevistos. Debido a la falta de información, el método de pronóstico utilizado por los proyectos para estimar el costo final no pudo ser manipulado estadísticamente como variable de control.

La muestra inicial del estudio la conformaron 135 proyectos de construcción, de los cuales se excluyeron aquellos proyectos con desviaciones en costo iguales a 0% y/o mayores a 100% y/o con índices de anticipación mayores a 1. Se excluyeron proyectos con desviaciones mayores al 100% porque estos valores extremos se ubicaban más allá de 3σ (desviaciones estándar de la muestra), es decir que su probabilidad de ocurrencia es menos del 1%. Adicionalmente, al considerar estos valores extremos como parte de la muestra, las distribuciones de probabilidad no representaban adecuadamente el comportamiento de la mayoría de los datos. Se

descartaron proyectos con desviaciones iguales a cero, pues en este estudio se buscaba medir el desempeño de los métodos de pronóstico de aquellos proyectos que tuvieron alguna desviación en costo, ya fuese positiva o negativa.

Finalmente, la muestra la conformaron 112 proyectos de construcción, los cuales fueron clasificados como proyectos con desviaciones positivas (Over-budget en inglés) y proyectos con desviaciones negativas (Under-budget en inglés), debido a que preliminarmente se identificaron diferencias importantes en el comportamiento de las desviaciones en costo e índices de anticipación entre estos dos grupos (Mejía & Franco, 2015). La Tabla 1 presenta un resumen de la muestra final del estudio, indicando el costo y la duración de los proyectos.

Tabla 1. Información General de los Proyectos ($N = 112$).

Proyectos	Información	Promedio	SD	Min.	Q1	Mediana	Q3	Max.
Over-budget N = 71	Costo [USM\$]	334.1	603.5	0.60	6.20	91.1	392.20	3,825.00
	Duración [Meses]	30.07	15.50	2.08	16.00	28.85	41.00	66.00
Under-budget N = 41	Costo [USM\$]	118.80	277.40	0.10	4.60	18.20	97.00	1,247.80
	Duración [Meses]	20.92	11.44	5.77	12.00	18.00	28.38	47.54
Total N= 112	Costo [USM\$]	255.30	517.90	0.10	5.30	33.20	273.00	3825,00
	Duración [Meses]	26.72	14.77	2.08	13.88	24.00	37.29	66.00

4.2 VARIABLES

Las variables principales de este estudio fueron la Desviación Final en Costo (FCD), el Error Final del Pronóstico (FFE) y el Índice de Cantidad de Información $I(FFE)$. Con el propósito de comparar este nuevo índice con los tradicionalmente utilizados y recientemente propuestos para medir el desempeño de los métodos de pronóstico, se calculó el Índice de Anticipación (TI en inglés) y los siguientes índices de precisión: el Porcentaje de Error Medio Absoluto ($MAPE$ en inglés), Error de la Mediana Absoluto ($MdAPE$ en inglés), el Error Medio Absoluto Simétrico ($sMAPE$ en inglés) y el Error de la Mediana Absoluto Simétrico ($sMdAPE$ en inglés). A lo largo del documento, se utilizarán las siglas en inglés cuando se haga referencia a cada una de las variables.

4.2.1 Variables Principales

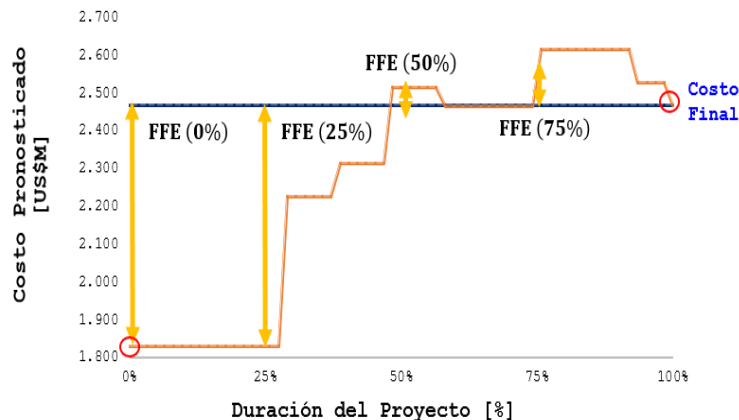
Tradicionalmente los sistemas de control reportan la desviación final del costo como un índice de evaluación de la gestión del proyecto, por ello este estudio lo consideró como una de sus variables principales para el análisis de resultados. La *FCD* se calculó como la diferencia entre el costo final del proyecto y el costo final del proyecto pronosticado en el mes cero (calculado en la fecha de autorización del proyecto), en términos de porcentaje (ver Ecuación 3). Valores negativos indican que el proyecto finalizó por debajo del presupuesto inicial (under-budget) y valores positivos, que el que el proyecto finalizó por encima del presupuesto inicial (over-budget).

$$FCD (\%) = \frac{\text{Costo Final del Proyecto} - \text{Costo Pronosticado}_{t_0}}{\text{Costo Pronosticado}_{t_0}} \quad (3)$$

El *FFE* se calculó como la diferencia entre el costo final del proyecto pronosticado en el mes cero y el costo final del proyecto, en términos de porcentaje (ver Ecuación 4). Valores negativos indican que el pronóstico sub-estimo el costo final del proyecto (Over-budget) y valores positivos que el método de pronóstico sobre-estimo el costo final del proyecto (Under-budget). El *FFE* se calculó en diferentes puntos de avance del proyecto, al 0%, 25%, 50% y 75% (ver Figura 4) y a partir de esta variable se calculó el índice de cantidad de información.

$$FFE (\%) = \frac{\text{Costo Pronosticado}_{t_0} - \text{Costo Final del Proyecto}}{\text{Costo Final del Proyecto}} \quad (4)$$

Figura 4. Error del método de pronóstico en diferentes puntos de ejecución del proyecto.



4.2.2 Índices

▪ Índice de Cantidad de Información

El concepto de cantidad de información propuesto por Shannon (1948) permite evaluar el desempeño de los métodos de pronóstico, al cuantificar la incertidumbre o variabilidad de las estimaciones de costo realizadas por los métodos. Con este propósito, se consideró al FFE como una variable aleatoria continua, la cual puede tomar diferentes valores $(FFE_1, \dots, FFE_i, \dots, FFE_n)$, denominados eventos. Este estudio cuantificó la probabilidad de ocurrencia de ciertos eventos no favorables del FFE_i , los cuales representan el conjunto de desviaciones en costo, mayores al evento FFE_i , que pudieron haber ocurrido durante la ejecución del proyecto. Es decir, la probabilidad de ocurrencia de $FFE \geq FFE_i$. Así, el $I(FFE_i)$ calculado se refiere a la cantidad de información que le hizo falta por comunicar a la variable, o al nivel de incertidumbre asociado; ya que la ocurrencia de estos eventos no favorables representa la posibilidad de haber obtenido un pronóstico más impreciso (ver Ecuación 5).

$$I(FFE_i) = \log_2 \left(\frac{1}{1 - p(FFE_i)} \right) = \log_2 \left(\frac{1}{p(FFE > FFE_i)} \right) \quad (5)$$

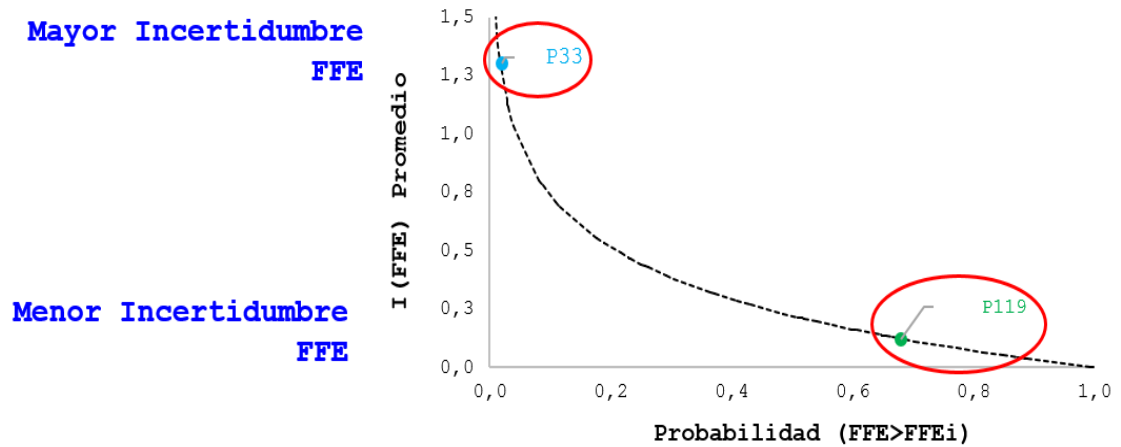
Para evaluar el desempeño del método de pronóstico a lo largo de la ejecución del proyecto, se calculó la cantidad de información promedio $\overline{I(FFE)}$ que proporcionan los eventos FFE_i , al 0%, 25% y 50% de avance; pues al 75% no fue posible encontrar una distribución de probabilidad que se ajustara correctamente a los datos, ni para los proyectos over-budget, ni para los under-budget (ver Ecuación 6). Este índice permite comparar la incertidumbre del FFE entre varios métodos de pronóstico. Entre menor sea el $\overline{I(FFE)}$, menor será la variabilidad o incertidumbre del FFE durante la ejecución del proyecto, y por consiguiente, mejor el desempeño del método de pronóstico.

$$\overline{I(FFE)} = \frac{1}{3k} \sum_{i=1}^3 \log_2 \frac{1}{p(FFE_i)} \quad (6)$$

El $\overline{I(FFE)}$ utiliza la constante k con el fin de proporcionar valores del índice fácilmente interpretables. El valor de k dependerá de los valores de probabilidad obtenidos para la muestra del estudio. Para este caso se utilizó un valor de $k = 4.5$ para ambos tipos de proyectos, over y under. Como resultado se obtuvieron valores

de $\overline{I(FFE)}$ que oscilan entre 0 y 1.5. Valores cercanos a 1.5 indican que la incertidumbre del FFE fue alta y valores cercanos a 0 que la incertidumbre del FFE fue baja (ver Figura 5).

Figura 5. Gráfica $\overline{I(FFE)}$ vs $P(FFE_i)$.



▪ Índices de Precisión

Los índices de precisión se calcularon con base en las medidas de error porcentual propuestas en la literatura, tal como se indica a continuación:

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \left| \frac{\text{Costo Final}_t - \text{Costo Pronosticado}_t}{\text{Costo Final}} \right| * 100 \quad (7)$$

$$MdAPE = \text{mediana} \left| \frac{\text{Costo Final} - \text{Costo Pronosticado}_t}{\text{Costo Final}} \right| * 100 \quad (8)$$

$$sMAPE = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \left| \frac{\text{Costo Final}_t - \text{Costo Pronosticado}_t}{\text{Costo Final}_t + \text{Costo Pronosticado}_t} \right| * 200 \quad (9)$$

$$sMdAPE = \text{mediana} \left(\frac{|\text{Costo Final}_t - \text{Costo Pronosticado}_t|}{(\text{Costo Final}_t + \text{Costo Pronosticado}_t)} \right) * 200 \quad (10)$$

- **Índice de Anticipación**

El *TI* se calculó como el área normalizada entre las curvas del costo pronosticado del proyecto a lo largo de su duración y su costo final, de acuerdo a lo expuesto por Grau & Back (2015). Dependiendo del tipo de proyecto over o under-budget, el *TI* se calculó matemáticamente como se indica en la Tabla 2.

Tabla 2. Cálculo del índice de anticipación de acuerdo al tipo de proyecto.

Tipo de Proyecto	Desviación Normal	Índice de Anticipación
Under-budget	$DN_t = - \left \frac{\text{Costo Pronosticado}_t - \text{Costo Final}}{\text{Costo Pronosticado}_{t_0} - \text{Costo Final}} \right $	$\sum_{t=1}^T (DN_{t-1}) * (\Delta \%x)$
Over-budget	$DN_t = \left \frac{\text{Costo Pronosticado}_t - \text{Costo Final}}{\text{Costo Pronosticado}_{t_0} - \text{Costo Final}} \right $	

Donde, DN_t es la desviación normal del proyecto para un tiempo t (meses), T es la duración final del proyecto y $\Delta \%x$ es el porcentaje de avance del proyecto.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 CARACTERÍSTICAS DE LAS VARIABLES E ÍNDICES

5.1.1 Variables Principales

La estadística descriptiva de las variables *FCD* y *FFE* reveló diferencias interesantes entre los proyectos over y under-budget (ver Tabla 3). La *FCD* promedio para los proyectos over-budget fue de 22.69%, con una mediana de 17.72%, y la *FCD* para los proyectos under-budget fue de 13.60%, con una mediana de 11.7%. Los valores de asimetría y curtosis del *FFE* fueron mayores en los proyectos under-budget y mayores para la *FCD* en los proyectos over-budget.

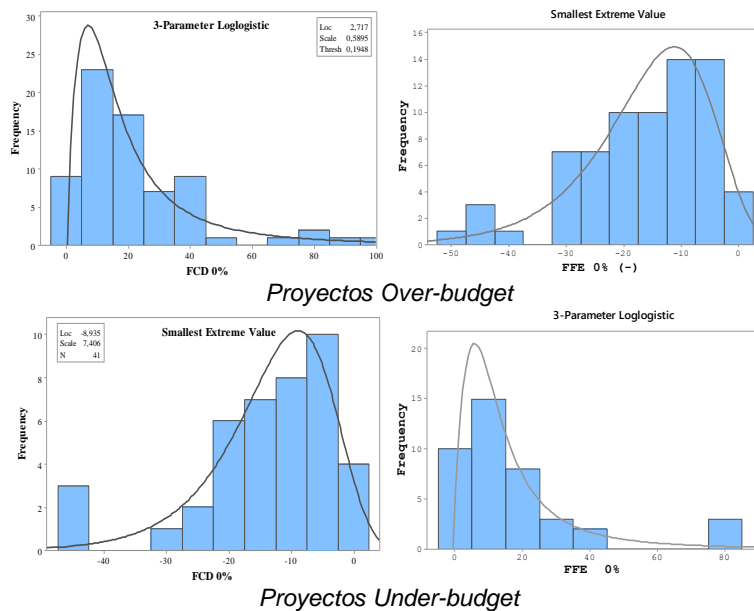
A diferencia de los proyectos under-budget, los proyectos over-budget presentaron una gran variedad de desviaciones durante el primer 50% de ejecución. Para los proyectos over-budget, el *FFE* presentó una distribución de probabilidad más

homogénea en la que se agrupan mejor los datos, mientras que en los proyectos under-budget este comportamiento se presentó con la *FCD* (ver Figura 6).

Tabla 3. Estadística descriptiva del *FCD* y *FFE* al 0% de ejecución del proyecto ($N = 112$).

Proyectos		Mean	SE Mean	SD	Min	Q1	Median	Q3	Max	Skewness	Kurtosis
Over N = 71	FCD	22.69	2.54	21.43	0.99	8.05	17.42	31.73	100.0	1.82	3.45
	FFE	16.50	1.41	11.84	0.98	7.45	14.83	24.09	50.0	0.98	0.57
Under N = 41	FCD	13.60	1.73	11.09	0.23	4.91	11.77	19.00	44.44	1.45	1.93
	FFE	18.13	3.03	19.40	0.23	5.17	13.35	23.45	80.00	2.16	4.49

Figura 6. Histogramas del *FCD* y *FFE* de los proyectos.



La mayoría de los estudios reportados en la literatura sobre desviaciones en costos de los proyectos han analizado las desviaciones considerando ambos tipos de proyectos (over y under) como un solo conjunto de datos. Sin embargo, los resultados de este trabajo indican que el comportamiento de las desviaciones para cada tipo de proyecto difiere. De hecho, autores como Flyvbjerg, Holm & Buhl (2002), y Shehu, Endut, Akintola & Holt (2014) también han resaltado estas diferencias. En el estudio realizado por Shehu, Endut, Akintola & Holt (2014), cuando los proyectos fueron considerados como un solo conjunto de datos, la desviación promedio de los proyectos fue de 2% debido al balance entre los valores

negativos y positivos de las desviaciones, mientras que cuando los proyectos fueron desagregados de acuerdo a su desviación (positiva o negativa), el promedio de las desviaciones para los proyectos over-budget fue de 11.7%. Estas diferencias, principalmente en las de distribuciones de la *FCD* y el *FFE*, sugieren realizar el análisis de las desviaciones de los proyectos, considerando cada tipo de proyecto por separado y además, para el análisis estadístico de proyectos, utilizar el *FFE* para los proyectos over-budget y la *FCD* para los proyectos under-budget.

La Tabla 4 presenta un resumen de la estadística descriptiva de los errores del pronóstico a lo largo de la ejecución del proyecto (0%, 25%, 50% y 75%). Aunque para ambos grupos (over y under), el promedio del *FFE* disminuye a medida que avanza la ejecución del proyecto, los métodos de los proyectos under-budget fueron más imprecisos. Los altos valores de la desviación estándar (*SD*) sugieren una gran variabilidad de los datos, mayor en los proyectos under-budget que en los over-budget. Para ambos grupos, al 75% de ejecución del proyecto, la variación del *FFE* fue de alrededor del 200%.

Tabla 4. Estadística descriptiva del *FFE* ($N = 112$).

	Proyectos Over-budget (N=71)				Proyectos Under-budget (N=41)			
	0%	25%	50%	75%	0%	25%	50%	75%
Mean	-16.5	-13.26	-9.19	-3.33	18.13	15.79	12.26	6.89
SE Mean	1.41	1.25	1.21	0.82	3.03	2.60	2.30	2.10
SD	11.84	10.53	10.21	6.89	19.4	16.63	14.74	13.43
CV%	-71.77	-79.41	-111.17	-207.09	107.01	105.32	120.26	194.82
Minimum	-50	-44.76	-44.76	-41.65	0.23	-2.14	-2.16	-3.32
Q1	-24.09	-20.02	-13.97	-4.28	5.17	5.13	2.93	0.22
Median	-14.83	-10.62	-6.93	-0.59	13.35	10.74	7.96	3.45
Q3	-7.45	-5.12	-1.27	0.00	23.45	21.52	19.80	7.71
Maximum	-0.98	8.16	2.81	2.95	80	80.00	80.00	80.00
Skewness	-0.98	-0.69	-1.45	-3.28	2.16	2.18	2.74	4.35
Kurtosis	-0.81	0.40	2.19	13.88	4.46	5.72	10.53	22.6

En todos los puntos de ejecución del proyecto analizados, los valores de asimetría y curtosis del *FFE* fueron mayores en los proyectos under-budget que en los over-budget. Esto se debe a lo ya mencionado anteriormente, para los proyectos under-budget el histograma de la *FCD* agrupa mejor los datos que el histograma del *FFE*. Estos valores de curtosis y asimetría indican problemas con la asunción de normalidad para cada conjunto de datos del *FFE* y justifican la necesidad de utilizar técnicas no paramétricas en el análisis estadístico de esta variable.

- **Distribuciones de Probabilidad: FFE**

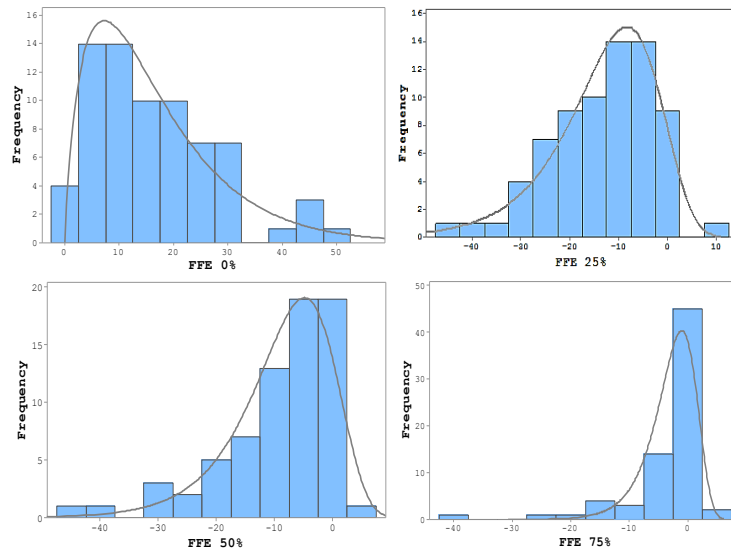
Para el cálculo del $I(\overline{FFE})$ es necesario estimar en primera instancia, las distribuciones de probabilidad que más se ajusten al conjunto de datos de la variable *FFE*. Para esto, se utilizó la prueba de bondad y ajuste Anderson Darling, identificando las distribuciones del *FFE* en cada uno de los puntos de análisis del proyecto y para cada grupo de proyectos.

Los resultados indicaron que para los proyectos over-budget, la distribución Gamma se ajusta mejor a los datos del *FFE* al 0% ($p > 0.25$). Los valores del *FFE* en este punto se consideraron como valor absoluto, pues en este caso, los proyectos ya están clasificados como over y under y el signo del error no es representativo. Para los demás puntos (25%, 50, y 75%) se mantuvo el signo del error; ya que en estos puntos es necesario identificar los cambios del método de pronóstico a lo largo de la ejecución del proyecto. Por su parte, la distribución de Valor Extremo más Pequeño fue la que mejor se ajustó a los datos del *FFE* al 25% ($p > 0.25$) y al 50% ($p = 0.025$) de ejecución del proyecto. Se aceptó el ajuste de esta distribución para los datos del *FFE* al 50% a un nivel de confianza de $\alpha = 0.1$. Esta distribución se define por los parámetros de escala (σ) y de localización (μ). La distribución de Valor Extremo más Pequeño también se ajustó a los datos del *FFE* al 0% ($AD = 0.591$); sin embargo, la distribución Gamma tuvo un mejor ajuste ($AD = 0.259$). Este trabajo no encontró una distribución de probabilidad que se ajustará correctamente a los datos del *FFE* al 75%, principalmente por sus altos valores de curtosis y asimetría. Para todos los casos analizados $p < 0.01$. La Figura 7 muestra las funciones de distribución de probabilidad del *FFE*, basadas en los parámetros presentados en la Tabla 5.

Tabla 5. Parámetros de la distribución del *FFE* para los proyectos over-budget ($N = 71$).

FFE	Distribución	Forma	Localización	Escala	Valor P
0%	Gamma	1.78	-	9.27	> 0.25
25%	Valor Extremo más Pequeño	-	-8.37	8.69	> 0.25
50%		-	-4.86	6.83	0.025
75%		-	-0.99	3.23	< 0.01

Figura 7. Histogramas del *FFE* de los proyectos over-budget.



Para los proyectos under-budget, la distribución de tres parámetros ($3P$) Log logística se ajustó adecuadamente a la mayoría de los datos del *FFE* ($p > 0.05$), excepto para el *FFE* al 75%. Esta distribución se define por los parámetros de escala (σ), ubicación (μ) y de umbral (δ). Estas distribuciones son significativamente asimétricas con largas colas. La Figura 8 muestra las funciones de distribución de probabilidad del *FFE*, basadas en los parámetros presentados en la Tabla 6.

Tabla 6. Parámetros de la distribución del *FFE* para los proyectos under-budget ($N = 41$).

FFE	Distribución	Ubicación	Escala	Umbral
0%		2.53	0.55	-0.69
25%	Loglogistic	2.68	0.44	-3.67
50%	3P	2.37	0.51	-2.96
75%		1.99	0.43	-3.90

El problema de ajuste de los datos del *FFE* al 75% fue más crítico para los proyectos over-budget ($AD = 4.279$), que para los proyectos under-budget ($AD = 0.73$). Este comportamiento se debe a que en la mayoría de los proyectos over-budget, al 75% las estimaciones de los métodos fueron cercanas al costo final ($FFE \approx 0$) (ver Figura 9a), mientras que en los proyectos under-budget, en este punto hubo mayor variabilidad, pues los métodos tardaron un poco más en estimar el costo final del

proyecto (ver Figura 9b). Aun así, no fue posible encontrar una distribución que se ajustara adecuadamente a estos valores en ningún grupo, por lo que este trabajo decidió no tomar en cuenta esta serie de datos para calcular el $\overline{I(FFE)}$. Por lo tanto, el $\overline{I(FFE)}$ calculado se refiere a la incertidumbre del FFE del método de pronóstico basado en los siguientes porcentajes de ejecución del proyecto 0%, 25% y 50% (ver Ecuación 6).

Figura 8. Histogramas del FFE de los proyectos under-budget.

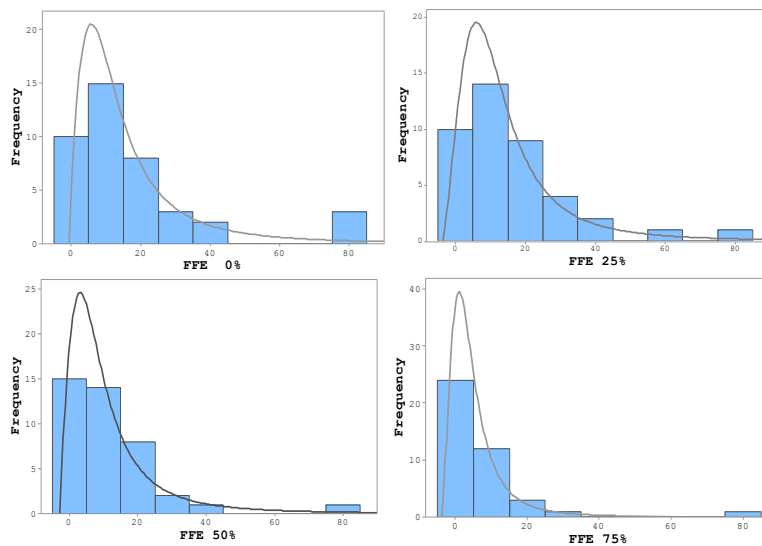
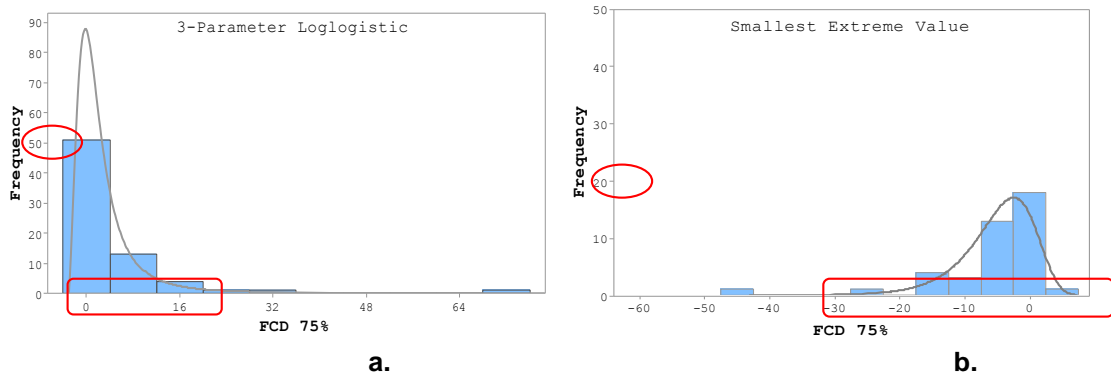


Figura 9. Distribución de probabilidad la FCD al 75% de los proyectos a) under y b) over-budget.



En algunos de los estudios reportados sobre desviaciones en costo de los proyectos se presentan principalmente las distribuciones de probabilidad a las que se ajusta la *FCD* de los proyectos, pero no las distribuciones de probabilidad del *FFE*. Por ejemplo, recientemente, Jasiukevicius & Vasiliauskaite (2015), encontraron que la distribución Log logística 3P representa correctamente los sobrecostos de proyectos de inversión pública en Lituania. Esta distribución también se ajustó a una muestra de 49 proyectos viales en Australia, con desviaciones en costo entre -12.84% y 70.45% (Love et al., 2015). Por su parte, la distribución Frechet de 3P se ajustó a una muestra de 276 proyectos de ingeniería y construcción, con desviaciones en costos entre -84.29% y 244.06% (Love et al., 2013). Nassar, Nassar & Hegab (2005), encontraron para una muestra de 219 proyectos de pavimentos en Illinois, con desviaciones en costo entre -28.5% y 72% que los datos seguían una Distribución Normal. En este trabajo, para los proyectos over-budget, la distribución que más se ajustó a los datos de la *FCD* fue la Log logística de 3P, mientras que para los proyectos under-budget fue la distribución del Valor Extremo más Pequeño.

5.1.2 Índice de Cantidad de Información

La incertidumbre promedio del *FFE* fue similar a lo largo de la ejecución de los proyectos (ver Tabla 7). El $I(\overline{FFE})$ promedio para los proyectos over-budget fue de 0.33 con una mediana de 0.25, y el $I(\overline{FFE})$ promedio para los proyectos under-budget fue de 0.31, con una mediana de 0.24. La mayor variabilidad del $I(FFE)$ se presentó al 50% en los proyectos over-budget y al 25% en los under-budget.

Tabla 7. Estadística descriptiva del $I(FFE)$ ($N = 112$).

	Proyectos Over-budget (N=71)				Proyectos Under-budget (N=41)			
	0%	25%	50%	Promedio	0%	25%	50%	Promedio
Mean	0.32	0.32	0.34	0.33	0.31	0.32	0.31	0.31
SE Mean	0.04	0.03	0.05	0.04	0.05	0.05	0.04	0.04
SD	0.30	0.29	0.39	0.30	0.29	0.30	0.29	0.28
CV%	93.38	92.61	115.21	92.55	93.78	95.90	91.89	90.63
Minimum	0.00	0.00	0.02	0.02	0.00	0.00	0.00	0.02
Q1	0.09	0.09	0.07	0.09	0.07	0.09	0.09	0.10
Median	0.20	0.20	0.21	0.25	0.26	0.22	0.23	0.24
Q3	0.47	0.47	0.47	0.41	0.47	0.48	0.54	0.45
Maximum	1.24	1.35	1.87	1.43	1.11	1.28	1.29	1.23
Skewness	1.33	1.38	2.00	1.59	1.39	1.46	1.33	1.39
Kurtosis	1.46	2.00	4.27	2.86	1.56	2.00	2.06	1.77

5.1.3 Índices de Precisión

La Tabla 8 presenta un resumen de la estadística descriptiva de los errores porcentuales de los métodos de pronóstico para ambos tipos de proyectos. Los valores de asimetría y curtosis de los errores fueron mayores en los proyectos under-budget, al igual que los coeficientes de variación (*CV*). Para ambos grupos se obtuvieron *CV* mayores al 80%. El índice con menor variabilidad fue el *MAPE* para los proyectos over-budget y el *sMdAPE* para los under-budget. Para ambos tipos de proyectos, el índice *MdAPE* presentó la mayor variación. Al comparar los errores porcentuales con el *FFE* al 0%, en todos los casos, los valores promedio obtenidos a partir de estas medidas estuvieron por debajo del *FFE* promedio y de la mediana de los proyectos over-budget (16.50%, 14.83%) y de los proyectos under-budget (18.13%, 13.35%) respectivamente.

Tabla 8. Estadística descriptiva de los errores porcentuales ($N = 112$).

	Over-budget (N=71)				Under-budget (N=41)			
	MAPE	MdAPE	sMAPE	sMdAPE	MAPE	MdAPE	sMAPE	sMdAPE
Mean	8.693	9.1	9.81	10.45	11.01	12.4	9.59	10.92
SE Mean	0.837	1.14	1.03	1.40	1.88	2.28	1.43	1.75
SD	7.053	9.65	8.71	11.83	12.03	14.6	9.13	11.22
CV %	81.13	106.01	88.76	113.21	109.3	117.73	95.19	102.70
Minimum	0.404	0.00	0.41	0.00	0.22	0.00	0.22	0.00
Q1	3.289	2.52	3.39	2.76	3.95	3.81	3.82	3.74
Median	7.331	6.26	8.00	7.17	6.63	7.96	6.37	7.66
Q3	11.19	11.89	12.50	13.73	14.49	19.57	13.32	17.82
Maximum	32.24	44.76	40.77	57.67	61.67	80.00	44.42	57.14
Skewness	1.39	1.79	1.67	2.04	2.49	2.81	1.98	2.08
Kurtosis	2.07	3.38	3.25	4.71	7.66	10.89	4.82	6.21

Las medidas de error porcentual al ser calculadas a partir de la mediana o el promedio de la serie de tiempo, no representan adecuadamente el error de la misma. En ocasiones los métodos de pronóstico estiman el costo final del proyecto en etapas tempranas de su ejecución, por lo que de ahí en adelante no se presentan errores en su pronóstico. En estos casos, al calcular el error a partir de estas medidas se está considerando la mediana y el promedio de los datos en donde la mayoría de ellos tiene valor cero.

5.1.4 Índice de Anticipación

La Tabla 9 presenta un resumen de la estadística descriptiva del *TI* de los métodos de pronóstico para ambos tipos de proyectos (over y under). Los histogramas del *TI* muestran una mejor distribución normal en los proyectos over-budget ($p = 0.947$), que en los under-budget ($p = 0.042$) (ver Figura 10). Los valores de asimetría y curtosis del *TI* fueron mayores en los proyectos under-budget, lo que indica que la estimación del costo final del proyecto ocurrió en sus etapas finales. A diferencia de los errores porcentuales y de los índices de desviación (*FCD* y *FFE*), los *TI* presentaron menor variabilidad ($CV < 35\%$).

Figura 10. Histogramas del *TI* de los proyectos a) over-budget y b) under-budget.

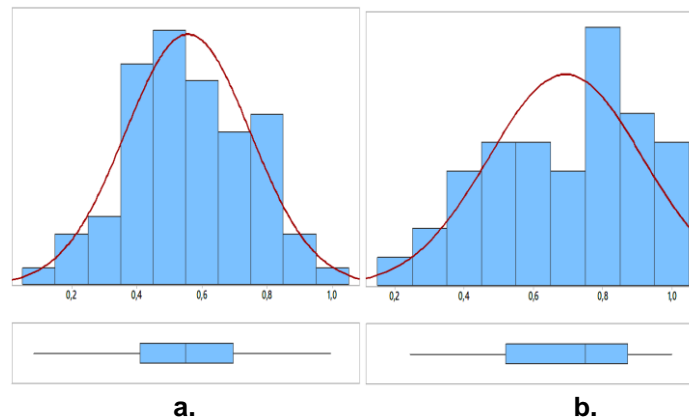
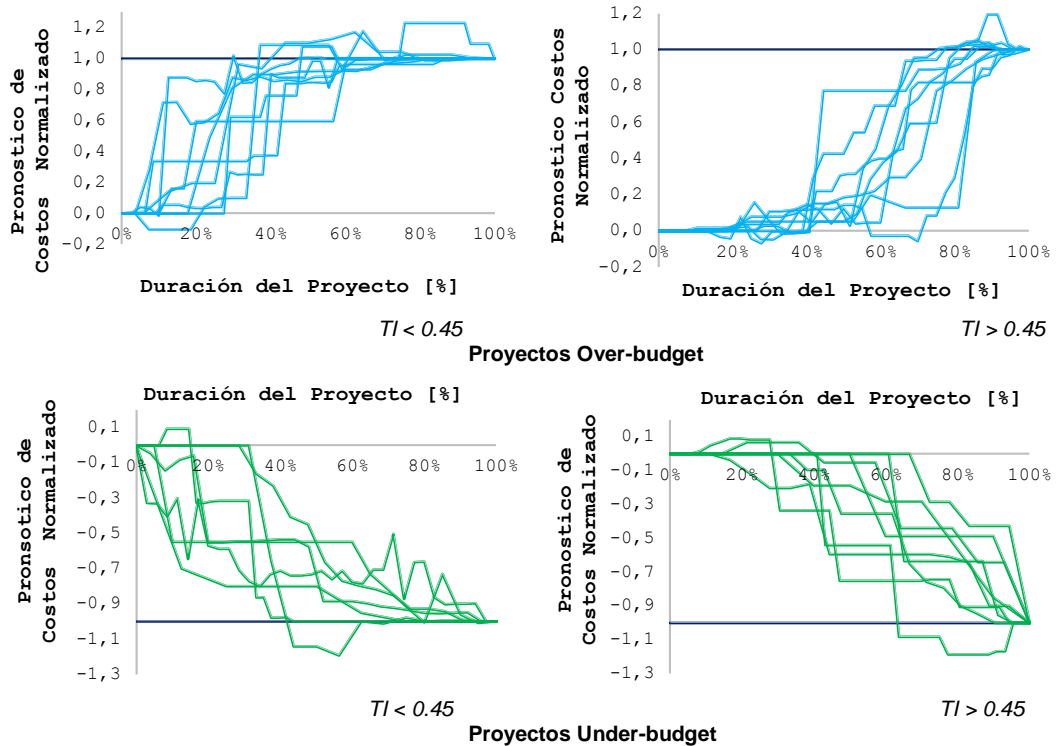


Tabla 9. Estadística descriptiva del *TI* ($N = 112$).

Proyectos	Mean	SE Mean	SD	Min	CV %	Q1	Median	Q3	Max	Skewness	Kurtosis
Over	0.56	0.02	0.19	0.08	34.49	0.41	0.55	0.69	0.99	-0.06	-0.33
Under	0.69	0.03	0.22	0.03	32.06	0.52	0.75	0.87	1.00	-0.36	-1.06

Al comparar el comportamiento de los métodos de pronóstico a lo largo de la ejecución del proyecto, se observó que la mayoría de los métodos (59%, over-budget y 81%, under-budget) empezaron a estimar el costo final del proyecto, en promedio, después del 45% de su ejecución y solo hasta aproximadamente el 80% - 85% de avance, los pronósticos se acercaron al costo final del proyecto. En la Figura 11 se presentan un conjunto de pronósticos con *TI* menores y mayores a 0.45 para cada grupo de proyectos.

Figura 11. Métodos de pronóstico con TI menores y mayores a 0.45.

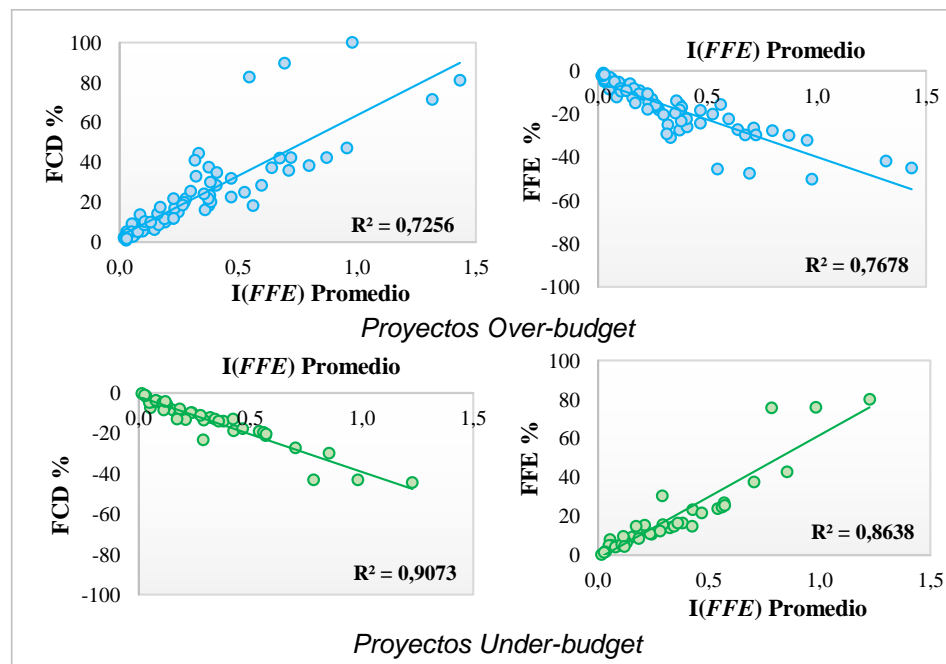


Según Mohd Nasira & Abd. Majid (2006), los métodos de pronóstico deberían detectar las desviaciones en costo durante el 25% de ejecución del proyecto, para que se puedan llevar a cabo medidas correctivas. Bajo esta consideración, se esperaría que la variabilidad de los métodos durante las últimas etapas del proyecto sea mínima. Sin embargo, para la muestra del estudio, los métodos de pronósticos estimaron el costo final del proyecto tarde, más los proyectos under-budget, que los over-budget. En promedio, los métodos empezaron a detectar desviaciones significativas en costo al 56% (0.56) y 69% (0.69) de avance en los proyectos over y under-budget respectivamente. Estos resultados son similares a los encontrados por Teicholz (1993) cuando comparo dos métodos de pronósticos, basados en una muestra de 121 proyectos finalizados. La anticipación promedio durante el primer 50% de ejecución del proyecto fue de 0.70 para el primero método y 0.55 para el segundo.

5.2 GRÁFICOS DE DISPERSIÓN: CORRELACIÓN

La Figura 12 muestra el grado de correlación entre los índices de desviación (FCD y FFE) y el $\overline{I(FFE)}$ para cada grupo de proyectos. El $\overline{I(FFE)}$ agrupa mejor los datos cuando se gráfica con el FFE para los proyectos over-budget y cuando se gráfica con el FCD para proyectos under-budget. La correlación entre el $\overline{I(FFE)}$ y ambos índices de desviación fue significativa para los dos grupos de proyectos ($R^2 > 0.72$). Estas correlaciones son positivas, lo que significa que índices de desviaciones de costo grandes se correlacionan con valores grandes del $\overline{I(FFE)}$. Entre más grande sea la desviación del proyecto o el error del pronóstico, mayor será la variabilidad o incertidumbre de la variable aleatoria - FFE .

Figura 12. Gráficos de dispersión: $\overline{I(FFE)}$ vs índices de desviación (FCD , FFE) para proyectos over y under-budget.



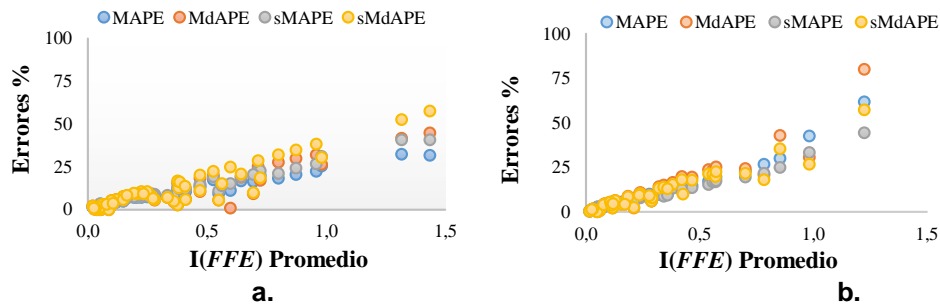
La Figura 13 muestra la relación entre el $\overline{I(FFE)}$ y los errores porcentuales de los métodos de pronóstico. La correlación entre estos índices es alta, debido a que el índice de cantidad de información fue calculado a partir del error del método de pronóstico. La mayor correlación se obtuvo al asociar el $\overline{I(FFE)}$ con el $sMAPE$ para

los proyectos over-budget y al asociar el $\overline{I(FFE)}$ con el $sMdAPE$ para los proyectos under-budget. Los índices de correlación se presentan en la Tabla 10.

Tabla 10. Correlación (R^2) entre el $\overline{I(FFE)}$ y los errores porcentuales.

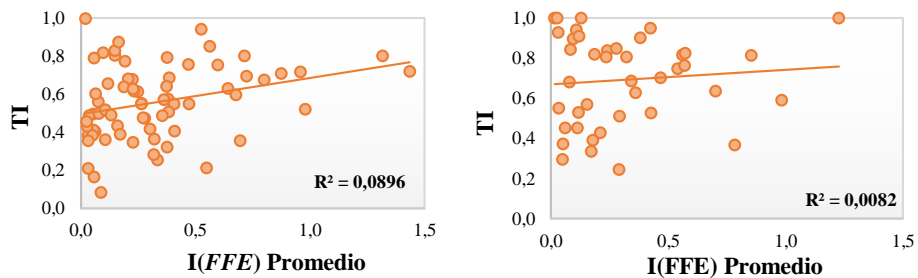
Grupo de Proyectos	MAPE	MdAPE	sMAPE	sMdAPE
Over- Budget ($N = 71$)	0.901	0.838	0.974	0.881
Uner-budget ($N = 41$)	0.852	0.936	0.896	0.968

Figura 13. Gráficos de dispersión $\overline{I(FFE)}$ vs % Error para proyectos a) over-budget y b) under-budget.



Al asociar el $\overline{I(FFE)}$ con el TI , no se encontró una correlación significativa ($R^2 < 0.1$) (ver Figura 14). Los gráficos de dispersión muestran que el $\overline{I(FFE)}$ agrupa mejor los datos cuando éste se grafica con los índices de precisión que con el índice de anticipación.

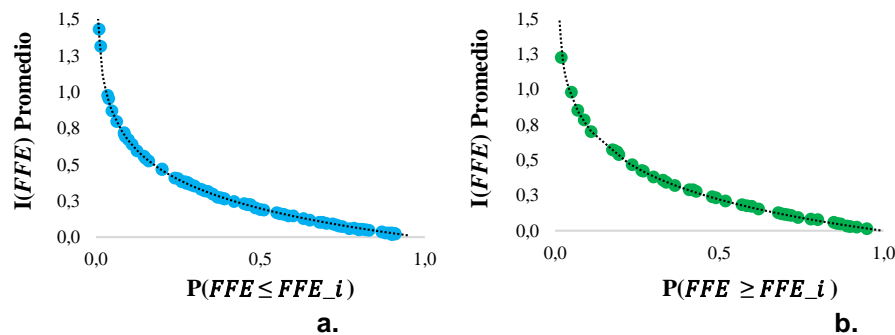
Figura 14. Gráficos de dispersión: $\overline{I(FFE)}$ vs TI para proyectos a) over-budget y b) under-budget.



5.3 GRÁFICO $\overline{I(FFE)}$ VS PROBABILIDAD

Se graficó el $\overline{I(FFE)}$ vs la probabilidad de ocurrencia de cada uno de los eventos: $FFE \leq FFE_i$ para los proyectos over-budget y $FFE \geq FFE_i$ para los proyectos under-budget (ver Figura 15). De esta manera se puede interpretar la incertidumbre asociada a la ocurrencia de los eventos no favorables del FFE . Esta gráfica permite comparar el desempeño de varios métodos pronóstico en términos de la incertidumbre del FFE , identificando fácilmente los métodos con menor o mayor variabilidad en su variable aleatoria. Métodos cuyo FFE tuvo una baja variabilidad o incertidumbre, sugieren un buen desempeño del método y una mejor confiabilidad del método para estimar el costo final del proyecto.

Figura 15. Gráfica $\overline{I(FFE)}$ vs Probabilidad para toda la muestra del estudio a) over-budget y b) under-budget.



En la Figura 16 se grafica un subconjunto de proyectos over-budget para analizar en los párrafos siguientes, si la clasificación que se obtiene de los proyectos, al considerar el incertidumbre como criterio para medir el desempeño de los métodos, tiene en cuenta también el TI y el FCD .

En este primer caso, los métodos de pronóstico con valores grandes de $\overline{I(FFE)}$, también tienen valores grandes del TI y la FCD . Aunque el proyecto 73, tiene una FCD del 100%, mayor a la desviación de los otros dos proyectos ($P40$ y $P33$), la incertidumbre del FFE de este método es menor porque, aunque no fue tan preciso, logro estimar las desviaciones en costo del proyecto con mucha más anterioridad que los otros dos métodos. Por esta razón, la variabilidad del FFE de este método en las etapas finales del proyecto, en comparación con los otros dos, fue mucho

menor y al promediar los valores en los tres puntos se obtiene un valor más pequeño. Los índices de estos proyectos se presentan en la Tabla 11.

Figura 16. Gráfica $\overline{I(FFE)}$ vs $P(FFE \leq FFE_i)$

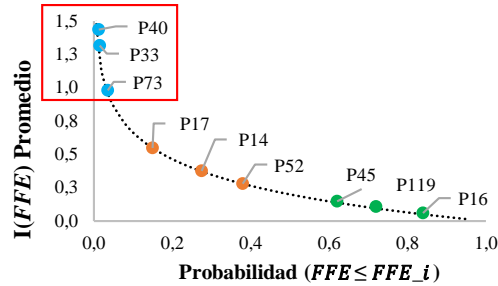


Tabla 11. Índices de los Proyectos 33, 40 y 73.

Proyecto	TI	FCD %	FFE %	$\overline{I(FFE)}$
40	0.72	81.04	44.76	1.43
33	0.80	71.37	41.65	1.31
73	0.52	100	50.00	0.98

En el segundo caso, los métodos de pronóstico con menor variabilidad en el *FFE*, tienen también valores pequeños del *TI* y la *FCD*. Excepto el método del proyecto 45; cuyo *TI* es mayor a 0.8. A pesar de que este método estima tarde el costo final del proyecto, la incertidumbre del *FFE* es baja porque el método es preciso. Una desviación en costo de esta magnitud (< 10%) no representa un riesgo para la meta de cumplir con los objetivos del proyecto en términos de presupuesto. Según el sistema de clasificación de estimación de costos propuesto por la Asociación Americana de Ingeniería de Costos, se espera un error entre 3% – 10% para un proyecto con un alcance definido entre un 50% – 100% (AACE, 2012). Los índices de estos proyectos se presentan en la Tabla 12.

Figura 17. Gráfica $\overline{I(FFE)}$ vs $P(FFE \leq FFE_i)$

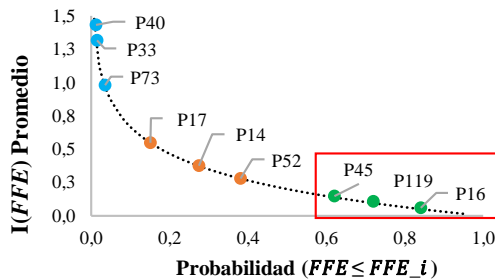


Tabla 12. Índices de los Proyectos 33, 40 y 73.

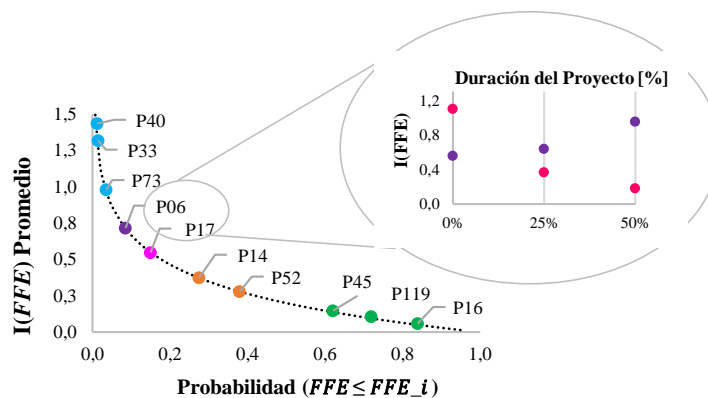
Proyecto	TI	FCD %	FFE %	$\overline{I(FFE)}$
45	0.83	6.25	5.88	0.15
119	0.36	10.34	9.37	0.10
16	0.16	8.05	7.45	0.06

Además de tener métodos con una incertidumbre alta o baja en el *FFE*, también hay métodos cuya incertidumbre en la variable no es tan crítica. Estos métodos se caracterizan por tener, ya sea, ambos índices (*TI* y *FCD*) con valores moderados (*P14* y *P52*), o algunos de los dos índices con un valor significativamente alto en comparación al otro (*P06* y *P17*). En este último caso, aunque la *FCD* del proyecto 17 (*FCD* = 82.69%) es mayor a la *FCD* del proyecto 6 (35.75%), el método del proyecto 6 estimó el costo final del proyecto tarde, lo que ocasionó que la incertidumbre de la variable se mantuviera durante la mayor parte del proyecto, mientras que la incertidumbre del *FFE* del método 17 disminuyó una vez este se acercó al costo final del proyecto (ver Figura 18). En ese sentido, cuando las desviaciones del proyecto son significativas y podrían poner en riesgo los objetivos del proyecto, resulta importante que el método de pronóstico sea oportuno de tal manera que se puedan tomar medidas correctivas para reducir la incertidumbre de la variable y por ende la del proyecto. Los índices de estos proyectos se presentan en la Tabla 13.

Tabla 13. Índices de los Proyectos 6, 17, 14 y 52.

Proyecto	TI	FCD %	FFE %	$I(FFE)$
P06	0.80	35.75	26.33	0.71
P17	0.21	82.69	45.26	0.55
P14	0.32	37.51	27.28	0.37
P52	0.47	21.74	17.86	0.28

Figura 18. $I(FFE)$ en cada punto de análisis para el P17 y P06.



Al comparar el desempeño de los métodos de pronóstico de proyectos con valores similares de FCD , tendrá mayor variabilidad el método que más se haya tardado en estimar el costo final del proyecto (ver Figura 19). Si por el contrario, los métodos de pronóstico tienen valores similares del TI , en este caso, tendrá mayor incertidumbre en su variable aleatoria (FFE), el método más impreciso (ver Figura 20).

Figura 19. $\overline{I(FFE)}$ para proyectos con igual FCD – Proyectos Over-budget.

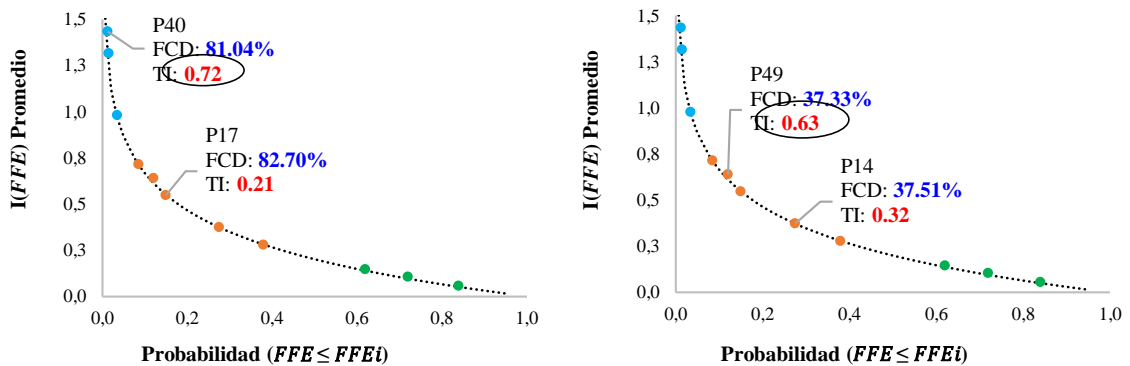
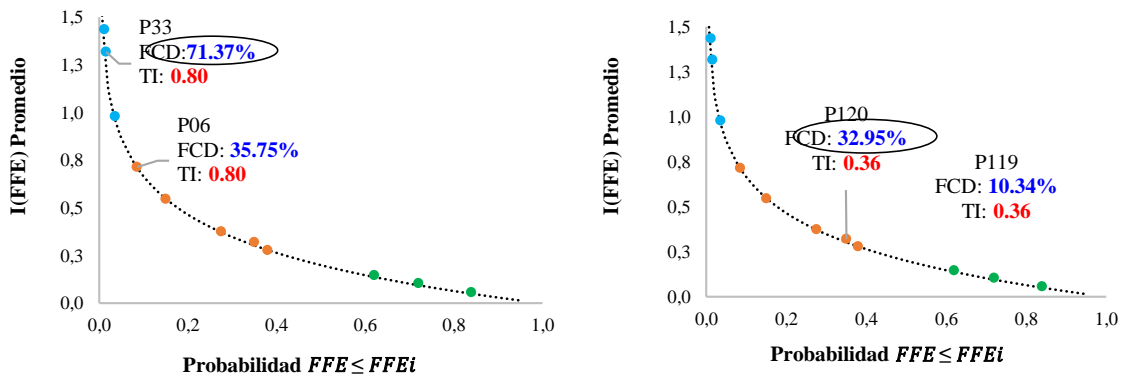


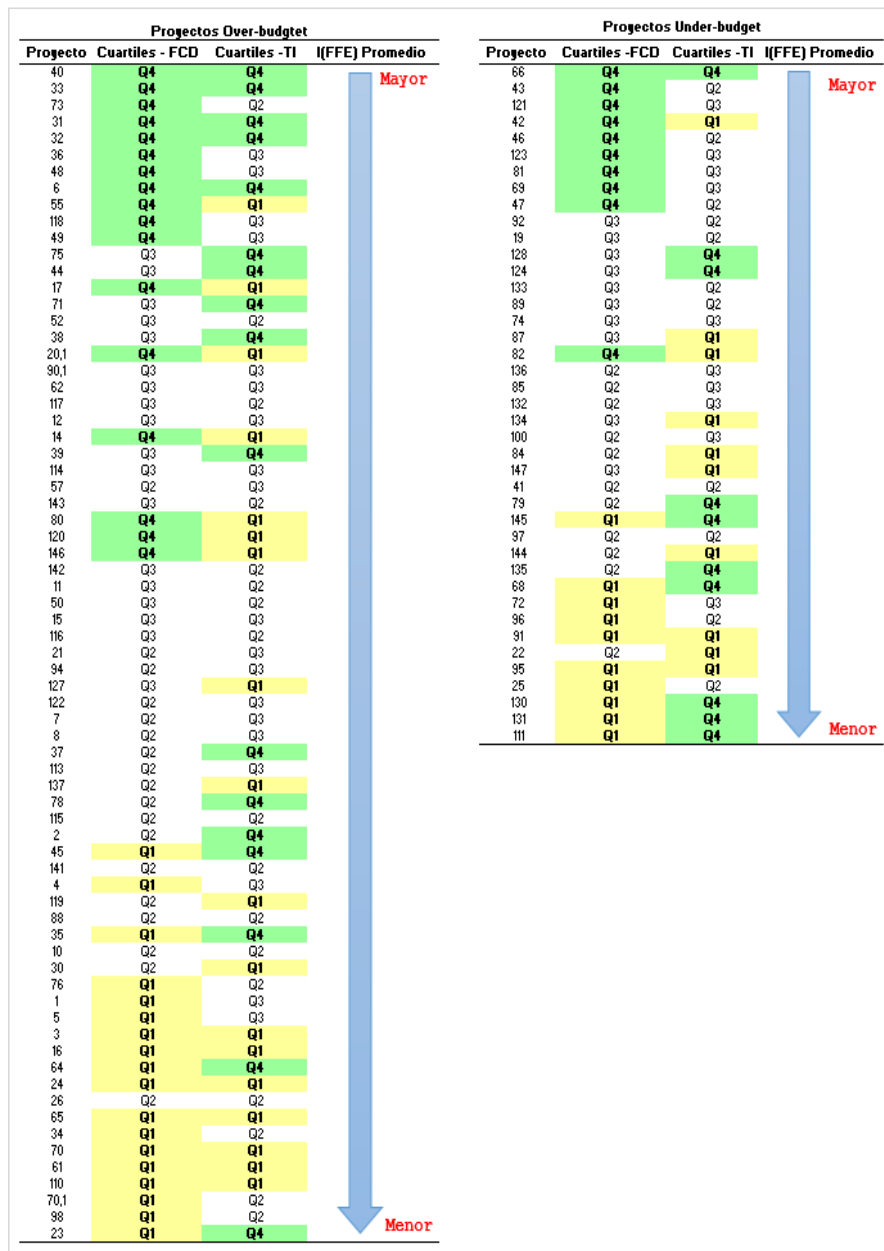
Figura 20. $\overline{I(FFE)}$ para proyectos con igual TI .



Los comportamientos previamente analizados, también se observan al ordenar los proyectos de mayor a menor $\overline{I(FFE)}$ y analizar el ordenamiento de los cuartiles del TI y FCD de los proyectos (ver Figura 21). Estos resultados indican que este nuevo

índice además, de ser una medida de la incertidumbre asociada a las estimaciones del método de pronóstico, al utilizarse como criterio para medir el desempeño de los métodos de pronóstico, en la clasificación que asigna a los proyectos, también tiene en cuenta el *TI* de los métodos, la *FCD* de los proyectos y por consiguiente el *FFE*.

Figura 21. Ordenamiento por cuartiles de la *FCD* y el *TI*, al considerar el $\overline{I(FFE)}$ como criterio para medir el desempeño de los métodos de pronóstico.

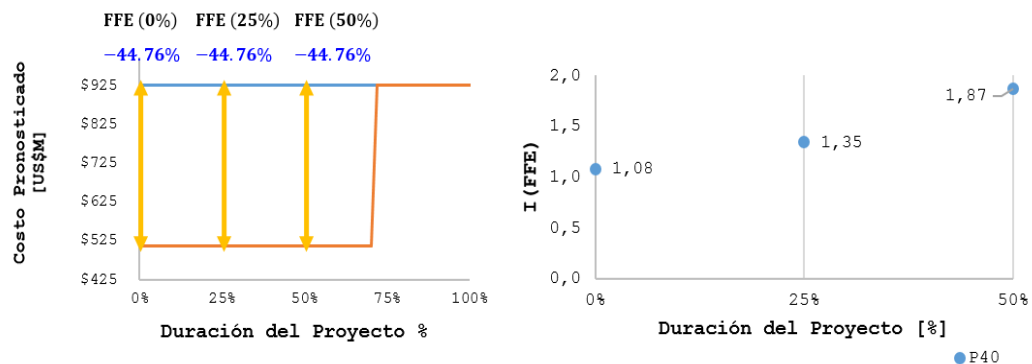


5.4 GESTIÓN DE LA INCERTIDUMBRE DEL PROYECTO

Conocer la incertidumbre del *FFE* del método de pronóstico en diferentes puntos de ejecución del proyecto permite inferir sobre cómo fue la gestión de la incertidumbre del proyecto dentro del sistema de control. A partir de este índice, se pueden identificar los puntos durante el ciclo de vida del proyecto, donde este estuvo expuesto a una mayor incertidumbre y donde más esfuerzos de gestión y control debieron realizarse para reducir dicha incertidumbre. A continuación se analizan algunos proyectos.

En la Figura 22, del $I(FFE)$ calculado en los diferentes puntos de análisis del proyecto 40, se observa que la incertidumbre del *FFE* aumento conforme se empezó a ejecutar el proyecto. Aunque el error es el mismo en los tres puntos ($FFE = -44.76\%$), la incertidumbre de la estimación difiere en cada uno de ellos porque las distribuciones de probabilidad son diferentes en cada punto. Este aumento en la incertidumbre de la variable indica que en comparación al desempeño de los otros métodos de la muestra, la variabilidad de esta variable fue mucho mayor en esos puntos. Podría decirse que el manejo de la incertidumbre dentro del sistema de control del proyecto no fue buena, porque la variable estuvo sujeta a valores grandes de incertidumbre, y además ésta no disminuyo a medida que se ejecutó el proyecto. Al 25% y 50% de ejecución, se debieron tomar ciertas medidas correctivas en miras a disminuir la incertidumbre del *FFE* y por consiguiente reducir la incertidumbre de las estimaciones del método del pronóstico.

Figura 22. Manejo de la incertidumbre del Proyecto 40.



El proyecto 17 tiene una $FCD = 82.69\%$ y el método de pronóstico un $FFE = 45.26\%$ y un $TI = 0.21$ (ver Figura 23). Al ser un método oportuno, una vez se inicia el proyecto, la incertidumbre de la variable se reduce. Es decir, que el rango de variabilidad del FFE se reduce a medida que el pronóstico es más preciso o se acerca más al costo final del proyecto. Entre más se demore el método en estimar el costo final del proyecto, la incertidumbre del FFE , dependiendo de las distribuciones de probabilidad en cada uno de los puntos, se mantendrá constante o aumentara a lo largo del proyecto. En este caso, la gestión de la incertidumbre del proyecto 17 fue buena, pues a medida que el proyecto se desarrolló, ésta se redujo y al 50%, la variabilidad del FFE ya era muy baja.

Figura 23. Manejo de la incertidumbre del Proyecto 17.

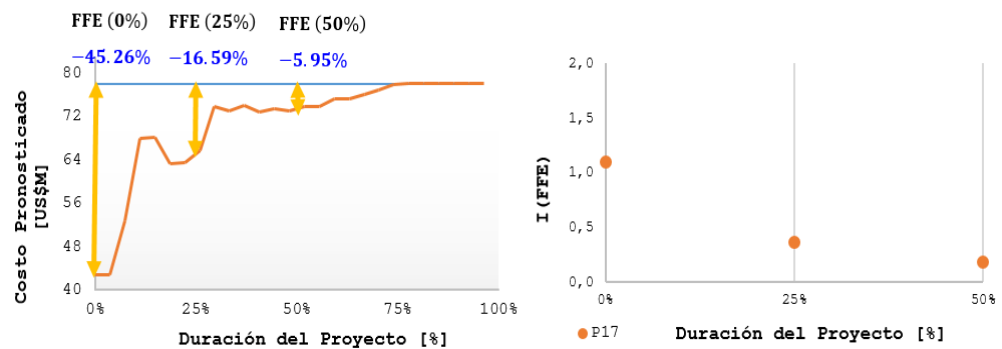
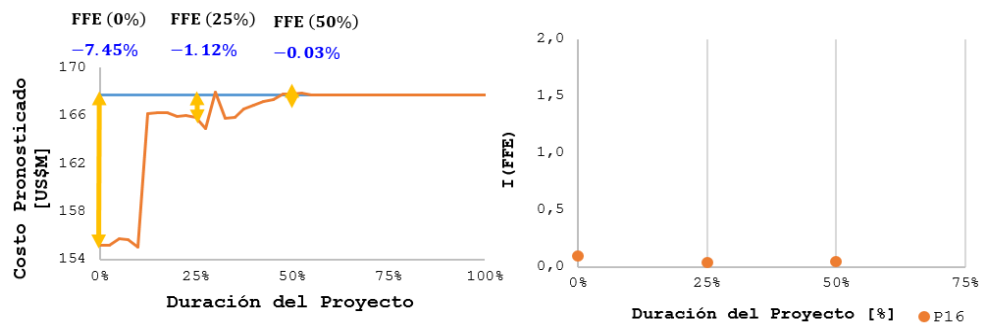
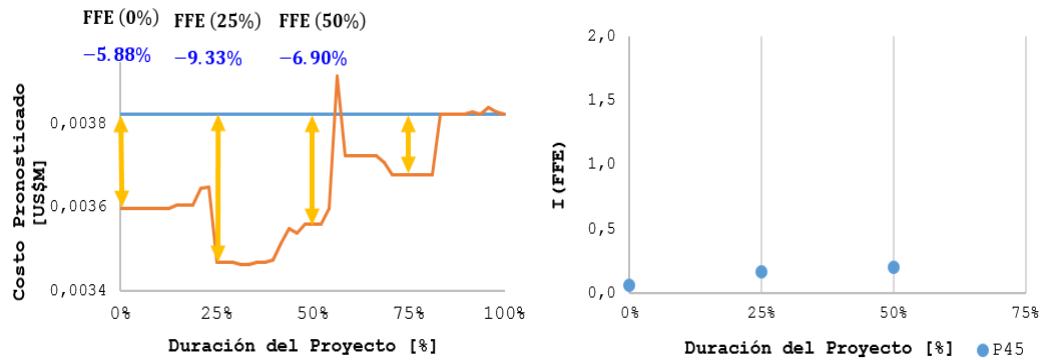


Figura 24. Manejo de la incertidumbre del Proyecto 16 y 45.



a) Proyecto 16

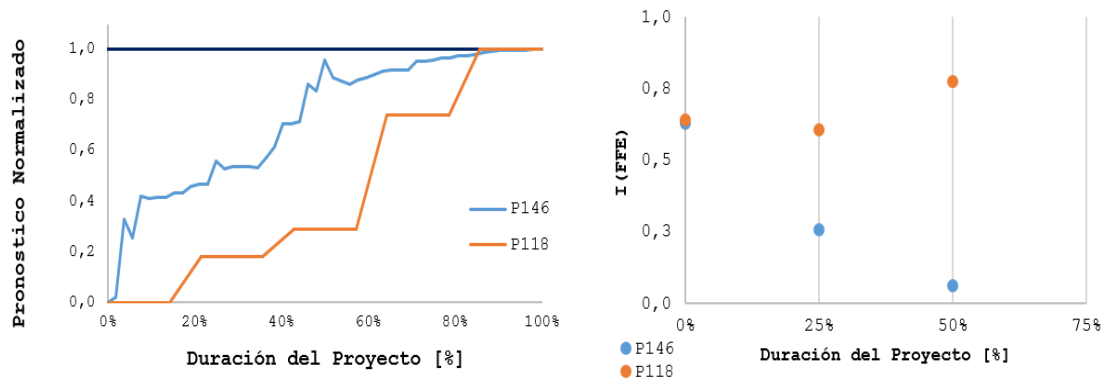


b) Proyecto 45

Por otra parte, la gestión de la incertidumbre del proyecto 16 fue muy buena, pues además de que la variabilidad del *FFE* fue baja, ésta se mantuvo constante a lo largo del proyecto (ver Figura 24). Esto indica que la desviación del proyecto fue pequeña ($FCD = 8.05\%$) y su método de pronóstico fue oportuno ($TI = 0.16$). Este comportamiento es similar para el proyecto 45 (ver Figura 24b). Aunque este método tiene un TI mayor (0.82), la desviación del proyecto es pequeña ($FCD = 6.25\%$) y no representa un riesgo para el proyecto. Por esta razón la variabilidad del *FFE* fue baja y similar en todos los puntos de análisis, indicando que la gestión de la incertidumbre del sistema de control del proyecto también fue buena.

En la Figura 25, aunque las desviaciones de los proyectos 146 y 118 son similares ($FCD = 41.04\%$ y $FCD = 42.00\%$ respectivamente), la gestión de la incertidumbre fue mejor para el sistema de control del proyecto 146; ya que este tuvo un método de pronóstico que detecto más rápido las desviaciones en costo del proyecto ($TI = 0.28$ vs $TI = 0.60$), conllevando a que la incertidumbre de la variable disminuyera en las etapas siguientes del proyecto. La incertidumbre del *FFE* del método 118 es más alta en comparación a la del método 146, porque además de ser un método poco preciso, es poco oportuno. Al 25% y 50% de ejecución se debieron tomar ciertas acciones para reducir la incertidumbre del proyecto.

Figura 25. Manejo de la incertidumbre del Proyecto 146 y 118.



La incertidumbre del *FFE* se calculó en tres puntos de ejecución 0%, 25% y 50%; ya que al 75% no fue posible encontrar un distribución de probabilidad que se ajustara adecuadamente a los datos del *FFE*, más en los proyectos over-budget que en los under-budget. Al promediar $I(FFE)$ en estos tres puntos, se cuantificó la incertidumbre de la variable durante el primer 50% de ejecución del proyecto. Sin embargo, si se considera la mediana del *TI* para cada grupo de proyectos, 0.55 para los over-budget y 0.75 para los under-budget, sería importante cuantificar la incertidumbre de la variable hasta estos puntos de ejecución del proyecto; ya que de ahí en adelante, en promedio, los métodos fueron más precisos y se acercaron más al costo final del proyecto. Además de considerar este rango de estudio, si se busca evaluar la gestión de la incertidumbre del proyecto y de la variable más detalladamente, sería razonable incluir más puntos de análisis durante ese intervalo, ya que algunos métodos tuvieron variaciones que no se pueden apreciar completamente en los 3 puntos analizados.

5.5 CAPACIDAD DE CLASIFICACIÓN DE LOS ÍNDICES

La sección actual presenta los resultados del análisis de proporciones que se utilizó para evaluar la capacidad de clasificación de cada uno de los índices de desempeño de los métodos de pronóstico. El análisis de proporciones examinó las diferencias en el ordenamiento que cada índice de desempeño de los métodos de pronóstico le asigna a los proyectos. Específicamente, se analizó cómo cambia la posición de un

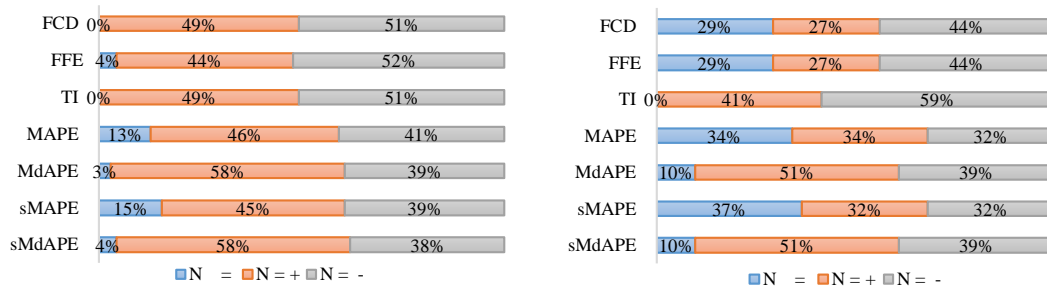
proyecto: (+) mayor posición, menor posición (-) o (=) igual posición, cuando cada uno es clasificado por cada uno de los índices analizados en este estudio.

5.5.1 Análisis de Proporciones

Los proyectos over-budget y under-budget fueron ordenados ascendentemente de acuerdo a cada índice. El rango u ordenamiento de los proyectos se asignó de acuerdo a la prueba de signos de Wilcoxon. La proporción de proyectos se calculó a partir de la frecuencia relativa de la muestra en cada uno de los 3 grupos: igual posición (=), mayor posición (+) y menor posición (-) (ver Figura. 26). Igual posición indica la proporción de proyectos cuya clasificación fue la misma al comparar el ordenamiento asignado por el $\overline{I(FFE)}$ con el ordenamiento de otro índice. Menor posición indica que el proyecto, al considerar el $\overline{I(FFE)}$ como criterio para medir el desempeño de los métodos de pronóstico, se ubicó en una posición más abajo en comparación al ordenamiento asignado por otro índice y mayor posición que el proyecto se ubicó en una posición más arriba. Si la proporción de coincidencia en el ordenamiento de los proyectos entre los índices es pequeña existe una diferencia significativa en la manera en que cada índice clasifica el desempeño de los métodos de los proyectos.

Los mayores porcentajes de coincidencia, al comparar el ordenamiento que asigna a los proyectos el $\overline{I(FFE)}$ con los demás índices, se presentaron en los proyectos under-budget. El ordenamiento del $\overline{I(FFE)}$ coincide un 29% con el ordenamiento del FFE y el FCD y entre los índices porcentuales de precisión, los índices $sMAPE$ y $MAPE$ coincidieron un 37% y 34% respectivamente con el ordenamiento del $\overline{I(FFE)}$. Para los proyectos over-budget, los porcentajes de coincidencia no fueron mayores al 15%. Adicionalmente, el ordenamiento que asigna a los proyectos el $\overline{I(FFE)}$ no coincide con el que asigna el TI para ningún tipo de proyecto.

Figura 26. Ordenamiento asignado por el $\overline{I(FFE)}$ con respecto a los demás índices para los proyectos over-budget y under-budget.



Cuando se mide el desempeño de los métodos de pronóstico a partir del $\overline{I(FFE)}$, en los proyectos over-budget, más del 50% de los proyectos se clasificaron más abajo en comparación a la clasificación asignada al utilizar ya sea el *FCD*, el *FFE* o el *TI*. Es decir que los métodos que son relativamente buenos o al menos estaban mejor clasificados, al utilizar alguno de estos criterios de manera separada para evaluar su desempeño (*FCD*, *FFE*, *TI*), no son tan buenos si el desempeño se evalúa por la incertidumbre que tuvo el *FFE*. Esto se debe porque en cierta medida, el $\overline{I(FFE)}$ tiene en cuenta el *FCD* y el *TI*. Para el caso de los proyectos under-budget, el 44% de los proyectos se clasificaron más abajo en comparación a la clasificación asignada al utilizar ya sea el *FCD* o el *FFE*. El mayor cambio se da al comparar el $\overline{I(FFE)}$ con el *TI*, un 59% de los métodos tuvieron una clasificación inferior al considerar el $\overline{I(FFE)}$. Para el caso de los índices de precisión porcentuales *MdAPE* y *sMdAPE* en ambos tipos de proyectos, la clasificación asignada a los métodos fue mejor al considerar el $\overline{I(FFE)}$ como medida de desempeño.

6. CONCLUSIONES

Ante la necesidad de métricas que informen a los directores del proyecto sobre el desempeño de los sistemas de control y de los métodos de pronóstico, este estudio propone un índice basado en el concepto de entropía y contenido de información propuesto por Shannon. El índice de cantidad de información mide la incertidumbre de las estimaciones en costo de los métodos de pronóstico a partir de la información que proporciona la ocurrencia de eventos no favorables del *FFE*. Este índice se comparó con los índices tradicionalmente usados y recientemente propuestos para

medir el desempeño de los métodos, como lo son la precisión y la anticipación. Los resultados muestran diferentes características y comportamientos entre los proyectos clasificados como over y under-budget.

6.1 ÍNDICE CANTIDAD DE INFORMACIÓN

La cuantificación de la incertidumbre de las estimaciones de los métodos de pronóstico, calculada a partir de la variable aleatoria FFE , puede interpretarse como la cantidad información que el FFE no comunica sobre la ocurrencia de sus eventos no favorables. Se refiere a la cantidad de información que habría sido necesaria para describir estos eventos, en caso de que realmente hubieran ocurrido. Esta falta de información se puede asociar al nivel de incertidumbre de sus estimaciones durante la ejecución del proyecto.

Los gráficos de dispersión mostraron que el $\overline{I(FFE)}$ agrupa mejor los datos cuando se grafica con los índices de precisión que con el índice de anticipación. Sin embargo, la magnitud de la incertidumbre del FFE dependerá no solo de la precisión del método sino también de su anticipación. Entre más inexacto y poco oportuno sea el pronóstico, mayor será la incertidumbre del FFE y por consiguiente la de sus estimaciones. Entre más preciso y oportuno sea el método, menor será la incertidumbre del FFE y por consiguiente la de sus estimaciones. Cuando los métodos tienen valores similares de desviación, la incertidumbre de la variable es mayor para aquellos métodos que se demoran más en estimar el costo final del proyecto. Análogamente, cuando los métodos tienen valores similares de TI , la incertidumbre del FFE es mayor para aquellos métodos que son más imprecisos. En el estudio se observó que, si la desviación del proyecto se encuentra dentro de un margen de error aceptable (menor al 10%), la poca prontitud del método para estimar el costo final del proyecto no representa un riesgo para el cumplimiento de los objetivos del proyecto en términos de presupuesto, y por tanto, la incertidumbre de la estimación del método es baja. Por otra parte, debido a que la cantidad de información que se está calculando es el promedio de la variabilidad de la variable en diversos puntos de análisis, los métodos con desviaciones grandes y oportunos tendrán menor incertidumbre que aquellos métodos con desviaciones un poco más pequeñas e índices de anticipación moderados o grandes, pues a diferencia de los primeros en donde la incertidumbre de la variable disminuye a medida que se ejecuta el proyecto, en estos últimos la incertidumbre de la variable, dependiendo

de las distribuciones de probabilidad de la muestra, se mantiene constante o incrementa con el paso del tiempo.

6.2 VENTAJAS DEL ÍNDICE DE CANTIDAD DE INFORMACIÓN

La incertidumbre del FFE , y por consiguiente de las estimaciones del pronóstico, se podría asociar con la confiabilidad del método para estimar los valores finales del proyecto. Entre menos variabilidad o incertidumbre del FFE , mejor será la confiabilidad del método para estimar el costo final del proyecto y más eficaces serán las decisiones que se tomen para el control de costos del proyecto. La cantidad de información promedio $I(\overline{FFE})$ permite comparar el desempeño de los métodos de pronóstico a partir de la incertidumbre del FFE . La gráfica de $I(\overline{FFE})$ vs la $P(FFE)$ es una herramienta gráfica muy útil para este fin; ya que a partir de esta se pueden identificar fácilmente los métodos con menor o mayor variabilidad en sus pronósticos. Métodos cuyo FFE tuvo una baja variabilidad o incertidumbre, sugieren un buen desempeño del método.

El $I(FFE)$ calculado en diferentes puntos de avance del proyecto permite analizar no solo como fue la variabilidad de la variable a lo largo de la ejecución del proyecto, sino también, permite inferir sobre como fue el manejo o la gestión de la incertidumbre en el sistema de control del proyecto. Es decir que, este índice también puede ser considerado como una medida de control que permite identificar puntos de mayor incertidumbre a lo largo del ciclo de vida del proyecto, donde se requieren más esfuerzos de gestión y control para reducir la incertidumbre de las estimaciones de los métodos.

Finalmente, resulta objetivo medir el desempeño de los métodos de pronóstico a partir del $I(\overline{FFE})$ porque no solo proporciona información sobre la incertidumbre de las estimaciones de los métodos sino que además tiene en cuenta la precisión y la anticipación de los métodos.

6.3 ÍNDICES TRADICIONALES DE DESEMPEÑO

Al comparar la capacidad de clasificación del índice de cantidad de información con los índices tradicionales de pronósticos, este estudio encontró que por la naturaleza

de los índices, la clasificación de los proyectos difiere al considerar cualquiera de los índices como criterio para medir el desempeño de los métodos, más en los proyectos over-budget que en los under-budget. Por esta razón, los métodos que son relativamente buenos o al menos estaban mejor clasificados, al utilizar alguno de estos criterios de manera separada para evaluar su desempeño (*FCD*, *FFE*, *TI*), no son tan buenos si el desempeño se evalúa al considerar la incertidumbre que tuvo el *FFE*, porque, en cierta medida, el $I(FFE)$ tiene en cuenta el *FCD* y el *TI*.

En el estudio se observó que para los proyectos over-budget, la *FCD* fue en promedio dos veces más que el promedio de la *FCD* de los proyectos under-budget. Las diferencias en las distribuciones de probabilidad de los índices de desviación sugieren utilizar en el análisis de desviaciones de los proyectos, el *FFE* en los proyectos over-budget y la *FCD* en los proyectos under-budget. Por otra parte, los métodos de pronósticos de la muestra, en su mayoría, estimaron el costo final del proyecto tarde, más en los proyectos under-budget, que en los over-budget. En promedio, los métodos empezaron a detectar desviaciones significativas en costo al 56% y 69% de avance en los proyectos over y under-budget respectivamente.

6.4 LIMITACIONES DEL ESTUDIO E INVESTIGACIÓN FUTURA

Este estudio solo considero proyectos con $FCD \leq 100\%$ y métodos con $TI \leq 1.0$; ya que los valores extremos de estos índices no permitieron un ajuste adecuado a una distribución de probabilidad. Adicionalmente, no se consideraron proyectos con $FCD = 0\%$ porque se buscaba medir el desempeño de los métodos de pronóstico de los proyectos que tuvieron alguna desviación en costo. El estudio clasificó y analizó los proyectos de acuerdo a su desviación final, positiva o negativa debido a que el comportamiento de las desviaciones y los índices de anticipación para cada grupo de proyectos difería. Se sugiere realizar estudios considerando proyectos con $FCD = 0\%$ y controlando estadísticamente la muestra, de acuerdo a otro tipo de variables moderadoras como el costo, la duración, el tipo de proyecto, y tipo de contrato, para analizar cómo varían los resultados.

Debido a la falta de información sobre los métodos de pronóstico utilizados para estimar el costo final de los proyectos de la muestra, se consideró como irrelevante la técnica utilizada. El propósito principal de esta investigación se centró en introducir el concepto de cantidad de información, derivado de la entropía, como un

mecanismo para cuantificar la incertidumbre del *FFE*. Sin embargo, al cuantificar la incertidumbre de las estimaciones de los métodos de pronóstico, resulta importante conocer el método utilizado, para que los directores de proyecto reconozcan la confiabilidad de cada uno de ellos y pueden seleccionar el más adecuado para estimar el costo final de los proyectos.

En este trabajo se dividieron los valores del $I(FFE)$ por una constante $k=4.5$ con el propósito de obtener valores dentro de un rango fácil de asociar a una incertidumbre alta o baja de la variable. Como resultado se obtuvieron valores de $I(FFE)$ que oscilan entre 0 y 1.5, en el que valores cercanos a 1.5 indican una incertidumbre alta y valores cercanos a 0 una incertidumbre baja. Por su parte, Asllani & Etkin (2007) clasificó la incertidumbre de los proyectos como baja si los valores de entropía se encontraban dentro del rango 1.0 a 1.5, y como alta si los valores eran mayores a 2.0. Dado que el enfoque de cantidad de información para cuantificar la incertidumbre de las estimaciones de los métodos de pronóstico no se ha aplicado de manera sistemática en el campo de gestión de la construcción, se requerirá de más estudios que permitan determinar el valor más apropiado para k , y por consiguiente, los rangos de incertidumbre de la variable.

Este trabajo es el punto de partida para empezar a analizar la divergencia de información que existe al considerar una distribución específica respecto de otra en cada uno de los puntos de análisis, y cómo varían los resultados del $I(FFE)$. Lo ideal sería utilizar la distribución de probabilidad en la cual se pierda la menor cantidad de información. Para esto, es necesario realizar más estudios en los que se tengan diferentes muestras de datos para conocer cual es la distribución de probabilidad que generalmente o más comunmente describe el comportamiento del *FFE* para cada tipo de proyecto, en cada uno de los puntos de análisis, y a partir de las medidas de divergencia, determinar las distribuciones que menos pierden información y seleccionarlas como distribuciones de referencia para cuantificar la incertidumbre de la variable, sin necesidad de contar con una muestra de datos significativa.

El siguiente paso en este estudio es aplicar formalmente el concepto de entropía de información para cuantificar la incertidumbre de la variable aleatoria y comparar los resultados encontrados en este estudio. El concepto de entropía permite además considerar 2 o 3 variables aleatorias. Por tanto, con el propósito de proporcionar una medida más completa sobre el desempeño del método de pronóstico, además

de la *FFE*, podría considerarse el *TI* como otra variable aleatoria continua. Adicionalmente, ante la relevancia de integrar los procesos de control del proyecto, sería interesante calcular de manera independiente la incertidumbre de las estimaciones en tiempo de los métodos de pronóstico y asociarla a la incertidumbre de las estimaciones en costo de los métodos, para tener una medida total de la incertidumbre del *FFE*.

REFERENCIAS

- AACE International. *AACE International recommended practices*. Morgantown, W.V: AACE International, 2012.
- Ahsan, K., & Gunawan, I. Analysis of cost and schedule performance of international development projects. *International Journal of Project Management*, 2010. Vol 28, no 1, p. 68 - 78.
- Alinaitwe, H., Apolot, R., and Tindiwensi, D. Investigation into the Causes of Delays and Cost Overruns in Uganda's Public Sector Construction Projects. *Journal of Construction in Developing Countries*, 2013. Vol 18, no 2, p. 33 – 47.
- Al-Jibouri, S. H. Monitoring Systems and their Effectiveness for Project Cost Control in Construction. *International Journal of Project Management*, 2003. Vol 21, p. 145 - 154.
- Asllani A. & Etkin L. An entropy-based approach for measuring project uncertainty. *Academy of Information and Management Sciences Journal*, 2007. Vol 10, no 1, p. 31 – 45.
- Bal, J., Cheung, Y., & Wu, H.-C. Entropy for Business Failure Prediction: An Improved Prediction Model for the Construction Industry. *Advance in Decision Sciences*, 2013. p. 1-14.
- Batselier, J., & Vanhoucke, M. Empirical Evaluation of Earned Value Management Forecasting Accuracy for Time and Cost. *Journal of Construction Engineering and Management*, 2015. Vol.141, no. 11, p. 501 - 510.
- Barraza, G.A., Back, W.E., & Mata, F. Probabilistic forecasting of project performance using stochastic s curves. *Journal of Construction Engineering and Management*, 2004. Vol. 130, p. 25-32.
- Bennett, J., & Ormerod, R. N. Simulation applied to construction projects. *Construction Management and Economics*, 1984. Vol 2, no. 3, p. 225 - 263.
- Bushuyev, S. D., & Sochnev, S. V. Entropy measurement as a project control tool. *International Journal of Project Management*, 1999. Vol. 17, no. 6, p. 343 - 350.
- Chan, A. P. C., Scott, D., & Lam, E. W. M. Framework of Success Criteria for Design/Build Projects. *Journal of Management in Engineering*, 2002. Vol. 18, p. 120 - 128.

Cheng, Y.-M. An Exploration into Cost-Influencing Factors on Construction Projects. *International Journal of Project Management*, 2014. Vol. 32, p. 850 - 860.

Christodoulou, S., Ellinas, G., & Aslani, P. Entropy-based scheduling of resource-constrained construction projects. *Automation in Construction*, 2009. Vol. 18, p. 919 - 928.

Construction Industry Institute & the University of Texas at Austin. *Global Project Controls and Management Systems: Research Summary 244-1*. Austin, TX: Construction Industry Institute, 2009.

Choi, J. & Russell, J. S. Long-Term Entropy and Profitability Change of United States Public Construction Firms. *Journal of Management in Engineering*, 2005. p. 17 - 26.

Collopy, F., & Armstrong, S. J. Another error measure for selection of the best forecasting method: The unbiased absolute percentage error, 2000.

De Gooijer, J. G., & Hyndman, R. J. 25 Years of Forecasting. *International Journal of Forecasting*, 2006. Vol. 22, p. 443 - 473.

Doloi H. Cost Overruns and Failure in Project Management: Understanding the Roles of key Stakeholders in Construction Projects. *Journal of Construction Engineering and Management*, 2013. p. 267 - 279.

Flyvberg, B., Holm, M. S., & Buhl, S. Underestimating costs in public works projects: Error or lie? *Journal of the American Planning Association*, 2002. Vol. 68, no. 3, p- 279 - 295.

Grau, D., Back, W. E. (2015) Predictability Index: Novel Metric to Assess Cost and Schedule Performance. *Journal of Construction Engineering and Management*, 2015. Vol. 3, no. 3, p. 1 - 8.

Grau, D., Back, W. E., Abbaszadegan, A., & Sirven, R. The Predictability Index - A Novel Project Performance Metric to Assess the Early Prediction of Cost and Time Outcomes. *Construction Research Congress*, 2014. p. 2306 - 2314.

Hamilton, A. C. *Cost Management*. AACE International Transactions, 2004

Hazir, O. A Review of Analytical Models, Approaches and Decision Support Tools in Project Monitoring and Control. *International Journal of Project Management*, 2014.

Hyndman, R. J., & Koehler, A. B. Another Look at Measures of Forecast Accuracy. *International Journal of Forecasting*, 2006. Vol 22, p. 679 - 688.

Isik, F. An entropy-based approach for measuring complexity in supply chains Research. *International Journal of Production*, 2010. Vol. 48, no. 12, p. 3681 – 3696.

Jasiukevicius, L., & Vasiliauskaite, A. Cost overrun risk assessment in the public investment projects: An empirically-grounded research. *Engineering Economics*, 2015. Vol. 26, no. 3, p. 245 - 254.

Khamooshi, H., & Cioffi, D. F. Uncertainty in task duration and cost estimates: Fusion of probabilistic forecasts and deterministic scheduling. *Journal of Construction Engineering and Management*, 2013. Vol. 139, no. 5, p. 488 - 497.

Kim, B.-C., & Reinschmidt, K. F. Combination of Project Cost Forecasts in Earned Value Management. *Journal of Construction Engineering and Management*, 2011. Vol. 137, no. 11, p. 958 - 966.

Kim, B. C. (2007). *Forecasting Project Progress and Early Warning of Project Overruns with Probabilistic Methods*. Dissertation, Texas A&M University.

Kim, E.H., Wells, W.G., & Duffey, M.R. A model for effective implementation of Earned Value Management methodology. *International Journal of Project Management*, 2003. Vol. 21, no. 5, p. 375 - 382.

Love, P. E. D., Sing, C.-P., Carey, B., & Kim, J. T. Estimating Construction Contingency: Accommodating the Potential for Cost Overruns in Road Construction Projects. *Journal of Infrastructure Systems*, 2015. Vol. 21, no. 2, p. 4014035.

Love, P. D., Wang, X., Sing, C.-p., & Tiong, R. L. Determining the Probability of Project Cost Overruns. *Journal of Construction Engineering and Management*, 2013. p. 321 - 330.

Mejía A., G., & Franco Duran, D. M. Assessment of Forecasting: A comparison of Timeliness Indexes for Construction Projects. 35th International Symposium on Forecasting. Riverside, California. Estados Unidos, 2015.

Nassar, K. M., Nassar, W. M., & Hegab, M. Y. Evaluating Cost Overruns of Asphalt Paving Project Using Statistical Process Control Methods. *Journal of Construction Engineering and Management*, 2005. Vol. 131, no. 11, p. 1173 - 1178.

Mohd Nasira, S., & Abd. Majid Z. Project cost performance forecasting system. In: 6th Asia-Pacific Structural Engineering and Construction Conference, September 2006, Kuala Lumpur, Malaysia, 2006.

Narbaev, T., & De Marco, A. An Earned Schedule-based Regression model to improve cost estimate at completion. *International Journal of Project Management*, 2014. Vol. 32, p. 1007 -1018.

Odeck, J. Cost overruns in road construction — what are their sizes and determinants? *Transport Policy*, 2004. Vol. 11, p. 43 - 53.

Ogunnaike, B. *Random Phenomena: Fundamentals of Probability and Statistics for Engineers*. En Information, Entropy and Probability Models CRC Press, 2010. p. 335 - 354.

Ozkul, S., Harmancioglu, N. B., & Singh, V. P. Entropy-based Assessment of Water Quality Monitoring Networks. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2000. p. 90 -100.

Pajares, J., & López-Paredes, A. An Extension of the EVM Analysis for Project Monitoring: The Cost Control Index and Schedule Control Index. *International Journal of Project Management*, 2011. Vol. 29, p. 615 - 621.

Rahman, I. A., Memon, A. H., & Abd Karim, A. T. Significant Factors Causing Cost Overruns in Large Construction Projects in Malaysia. *Journal of Applied Sciences*, 2013. Vol. 13, no. 2, p. 286 - 293.

Rajan, T. A., Gopinath, G., & Behera, M. (2014). PPPs and Project Overruns: Evidence from Road Projects in India. *Journal of Construction Engineering and Management*, 2014. Vol.140, no. 5.

Shannon, C. E. A mathematical theory of communication. *Bell System Technical Journal*, 1948. Vol. 27, no. 3.

Shehu, Z., Endut, I. R., Akintola, A., & Holt, G. D. Cost overrun in the Malaysian construction industry projects: A deeper insight. *International Journal of Project Management*, 2014. Vol. 32, p. 1471 - 1480.

Singh, V. P. *Entropy theory in hydraulic engineering: An introduction*. Reston, Virginia: ASCE, 2014.

Tang, C. M., Leung, A. Y., & Lam, K. C. Entropy Application to Improve Construction Finance Decisions. *Journal of Construction Engineering and Management*, 2006. Vol. 132, no. 10, p. 1099 - 1113.

Teicholz, P. Forecasting Final Cost and Budget of Construction Projects. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 1993. Vol. 7, no. 4, p. 511 - 529.

Vanhoucke, M. *Measuring time: Improving project performance using earned value management*. New York: Springer-Verlag, 2009.

Vandevoorde, S., & Vanhoucke, M. (2006). A comparison of different project duration forecasting methods using earned value metrics. *International Journal of Project Management*, 2006. Vol. 24, p. 289 - 302.

Xiao-mei, G., & Xiao-jun, L. Application of Entropy Measurement in Risk Assessment of the Engineering Project of Construction-Agent System. *System Engineering Procedia*, 2001. Vol. 1, p. 244 - 249.