

# TESIS DOCTORAL

2019

METODOLOGÍA PARA EL SEGUIMIENTO  
Y CONTROL DE PROYECTOS COMPLEJOS  
DE CONSTRUCCIÓN. APLICACIÓN EN EL  
SECTOR HIDROENERGÉTICO

PAÚL URGILÉS BUESTAN

DOCTORADO EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:  
INGENIERÍA DE CONSTRUCCIÓN Y PROYECTOS

DIRECTORES:  
MIGUEL ÁNGEL SEBASTIÁN  
JUAN CLAVER GIL



# Resumen

Esta Tesis Doctoral desarrolló una metodología denominada CTCR para el seguimiento y control de proyectos complejos de construcción aplicado al sector hidroenergético. Esta metodología permite el cálculo periódico de métricas del avance físico, avance financiero y predicciones de costo y plazo a la conclusión del proyecto. A diferencia de las técnicas y metodologías tradicionales existentes, que se caracterizan por su análisis basado exclusivamente en el costo de las actividades planificadas, la metodología CTCR involucra otros componentes fundamentales dentro de la gestión de un proyecto, como: costo, el plazo, criticidad y riesgos de cada actividad que conforman la planificación del proyecto.

El estado del arte de esta Tesis Doctoral, abordó conceptos fundamentales en materia de Dirección de Proyectos, como: seguimiento y control, complejidad, proyectos complejos de construcción, entre otros. Adicionalmente, se realizó una revisión de las principales técnicas y metodologías tradicionales existentes para el seguimiento y control de proyectos, destacando como principal la denominada Earned Value Managemet.

La verificación y eficiencia de la metodología CTCR y su comparación con otras técnicas y metodologías tradicionales, se las realizó a través de la construcción de modelos de simulación estocásticos aplicados a cuatro casos de estudio, conformados por proyectos hidroeléctricos reales desarrollados en la República del Ecuador.

# Abstract

This Doctoral Thesis developed a methodology called CTCR for the monitoring and control of complex construction projects applied to the hydropower sector. This methodology allows the periodic calculation of metrics of physical progress, financial progress and predictions of cost and term at the conclusion of the project. Unlike existing traditional techniques and methodologies, which are characterized by their analysis based exclusively on the cost of planned activities, the CTCR methodology involves other fundamental components within the management of a project, such as: cost, time, criticality and risks of each activity that make up the project planning.

The state of the art of this Doctoral Thesis, addressed fundamental concepts in the field of Project Management, such as: monitoring and control, complexity, complex construction projects, among others. Additionally, a review of the main existing traditional techniques and methodologies for the monitoring and control of projects was carried out, the main one being the one called Earned Value Management.

The verification and efficiency of the CTCR methodology and its comparison with other traditional techniques and methodologies were carried out through the construction of stochastic simulation models applied to four case studies, made up of real hydroelectric projects developed in the Republic of Ecuador

# Agradecimientos

Un sincero agradecimiento a Miguel Ángel Sebastián y a Juan Claver Gil, por su apoyo, sus consejos, y toda su experiencia depositada en cada paso de este trabajo.

A mi familia, gracias por ese apoyo permanente.



# Índice de contenidos

Capítulo 1	Introducción .....	1
1.1	Antecedentes de la investigación .....	1
1.2	Problema de investigación .....	2
1.3	Justificación de la investigación.....	3
1.4	Metodología.....	5
1.5	Esquema general de la Tesis Doctoral.....	7
Capítulo 2	Estado del Arte.....	10
2.1	Introducción .....	10
2.2	Dirección de proyectos .....	10
2.3	Seguimiento y control de proyectos.....	15
2.4	Proyectos de construcción complejos.....	19
2.4.1	Definiciones.....	20
2.4.2	La complejidad en proyectos .....	22
2.5	Revisión de metodologías de seguimiento y control de proyectos .....	28
2.5.1	Cronograma Valorado.....	30
2.5.2	Metodología Gobierno por Resultados (GPR).....	35
2.5.3	Sistema Last Planner.....	38
2.5.4	Técnica del Valor Ganado EVM .....	41

2.5.5	Cronograma Ganado .....	50
2.5.6	Opinión de expertos .....	51
2.5.7	Otras metodologías de apoyo .....	53
2.6	Aplicación en el Ecuador.....	59
2.6.1	Normativa ecuatoriana en administración y fiscalización de proyectos de construcción.....	60
Capítulo 3	Metodología .....	69
3.1	Introducción .....	69
3.2	Desarrollo de la metodología de seguimiento y control de proyectos complejos de construcción.....	70
3.2.1	Línea Base.....	71
3.2.2	Medición del avance físico .....	78
3.2.3	Medición del avance presupuestario .....	79
3.2.4	Medición del avance de la ruta crítica.....	80
3.2.5	Proyección de costos.....	81
3.2.6	Proyección de tiempo .....	83
3.2.7	Adaptación del Analytic Hierarchy Process para la ponderación de los factores K .....	84
3.2.8	Ejemplo básico de aplicación .....	93
3.3	Métodos de comprobación.....	109
3.3.1	Modelo de simulación .....	109

3.3.2	El Método de comprobación .....	112
3.3.3	Estructura de los modelos de simulación .....	114
3.3.4	Software especializado .....	135
Capítulo 4	Aplicación en el sector hidroenergético .....	139
4.1	Introducción .....	139
4.1.1	El sector hidroenergético en el Ecuador.....	142
4.1.2	Capacidad hídrica en el Ecuador .....	143
4.1.3	Planificación de la demanda .....	143
4.1.4	Plan de expansión de la generación en el Ecuador .....	144
4.2	Centrales hidroeléctricas como proyectos complejos de construcción	145
4.2.1	Centrales hidroeléctricas .....	145
4.2.2	Principales componentes de una central hidroeléctrica .....	146
4.2.3	Complejidad en proyectos hidroeléctricos .....	148
4.3	Desempeño en la gestión de proyectos hidroeléctricos.....	152
4.3.1	Situación internacional .....	152
4.3.2	Situación en el Ecuador .....	161
4.4	Resultados de ponderación de los factores K .....	162
4.4.1	Factores K para proyecto hidroeléctrico Cardenillo .....	163
4.4.2	Factores K para proyecto hidroeléctrico Mazar Dudas .....	164
4.4.3	Factores K para proyecto hidroeléctrico Sopladora.....	166
4.4.4	Factores K para proyecto hidroeléctrico Santiago.....	167

4.4.5	Factores K resultantes.....	169
4.5	Resultados de los modelos de simulación .....	169
4.5.1	Resultados de simulación para el proyecto hidroeléctrico Cardenillo 170	
4.5.2	Resultados de la simulación para el proyecto hidroeléctrico Mazar Dudas 179	
4.5.3	Resultados de simulación para el proyecto hidroeléctrico Sopladora 188	
4.5.4	Resultados de simulación para el proyecto hidroeléctrico Santiago 196	
4.6	Análisis estadístico de los datos .....	206
4.6.1	Estadística para el proyecto hidroeléctrico Cardenillo.....	207
4.6.2	Estadística para el proyecto hidroeléctrico Mazar Dudas.....	233
4.6.3	Estadística para el proyecto hidroeléctrico Sopladora.....	254
4.6.4	Estadística para el proyecto hidroeléctrico Santiago .....	278
4.7	Comprobación del método del Cronograma Valorado .....	303
4.7.1	Aplicación de la técnica del Cronograma Valorado .....	305
4.7.2	Resultados .....	306
Capítulo 5	Conclusiones e Investigaciones Futuras .....	311
5.1	Introducción .....	311
5.2	Conclusiones generales .....	312
5.3	Conclusiones particulares .....	314

5.3.1	Metodologías basadas exclusivamente en cronogramas valorados	315
5.3.2	La técnica EVM .....	315
5.3.3	La metodología CTCR .....	319
5.4	Conclusiones sobre el problema de investigación .....	322
5.5	Investigaciones futuras.....	323

# Lista de tablas

Tabla 2-1: Indicadores de complejidad y sus categorías según Kermanshachi, Dao, Shane, Anderson .....	25
Tabla 2-2: Indicadores de complejidad y sus categorías según Dao, Kermanshachi, Shane, Anderson, Hare .....	27
Tabla 2-3: Ejemplo de cronograma valorado .....	32
Tabla 2-4: Ejemplo de costos realmente ejecutados.....	33
Tabla 2-5: Ejemplo de planificación de costos de 5 tareas en 6 periodos de tiempo .....	44
Tabla 2-6: Ejemplo de planificación de costos de 5 tareas en 6 periodos .....	45
Tabla 2-7: Cálculo del Valor Ganado del ejemplo .....	46
Tabla 2-8: Cálculo de desempeño del costo, cronograma y predictores en el ejemplo.....	49
Tabla 3-1: Criterios Nivel 1 de importancia de las alternativas .....	88
Tabla 3-2: Criterios Nivel 2.....	89
Tabla 3-3: Escala fundamental de Saaty para el método AHP. Adaptada de [66] .....	90
Tabla 3-4: Cronograma de proyecto de ejemplo básico .....	93
Tabla 3-5: Cronograma con ponderación de riesgos del proyecto ejemplo .....	95
Tabla 3-6: Composición de la Línea Base del avance físico del ejemplo .....	95
Tabla 3-7: Cronograma de costos del proyecto básico de ejemplo .....	96

Tabla 3-8: Cronograma de proyecto ejemplo para Ruta Crítica.....	98
Tabla 3-9: Cronograma con el avance real en costos del proyecto ejemplo .....	99
Tabla 3-10: Cronograma con el avance real en tiempos del proyecto ejemplo .	100
Tabla 3-11: Cronograma del proyecto del ejemplo básico.....	101
Tabla 3-12: Composición del Avance Real en (%) del proyecto ejemplo .....	102
Tabla 3-13: Costos reales ejecutados del proyecto del ejemplo básico .....	103
Tabla 3-14: Avance real de ruta crítica del proyecto del ejemplo básico.....	104
Tabla 3-15: Avance real indicado en porcentaje y costos planificados del ejemplo básico.....	106
Tabla 3-16: Cálculo del EV para el ejemplo básico.....	106
Tabla 3-17: Cálculo de la proyección del costo a la conclusión del proyecto para el ejemplo básico .....	107
Tabla 3-18: Actividades resumen de la estructura de desglose de trabajo del proyecto hidroeléctrico Cardenillo.....	117
Tabla 3-19: Actividades resumen de la estructura de desglose de trabajo del proyecto hidroeléctrico Mazar Dudas.....	120
Tabla 3-20: Actividades resumen de la estructura de desglose de trabajo del proyecto hidroeléctrico Sopladora.....	122
Tabla 3-21: Actividades resumen de la estructura de desglose de trabajo del proyecto hidroeléctrico Santiago .....	124
Tabla 3-22: Muestra de la definición de variables de entrada del modelo para las actividades del cronograma del proyecto Cardenillo.....	132

Tabla 3-23: Muestra de definición de variables de salida en el modelo del proyecto Cardenillo .....	133
Tabla 3-24: Lista de Universidades clientes de Palisade.....	137
Tabla 4-1: Detalle técnico general de los proyectos hidroeléctricos para los casos de estudio.....	139
Tabla 4-2: Características de los cronogramas de los proyectos en análisis.....	141
Tabla 4-3: Centrales hidroeléctricas construidas en el Ecuador entre los años 2007-2016.....	142
Tabla 4-4: Proyectos hidroeléctricos actualmente en construcción en el Ecuador con inversión pública.....	143
Tabla 4-5: Proyectos hidroeléctricos estudiados y proyectados en el Ecuador para el año 2023 .....	145
Tabla 4-6: Análisis de características de un proyecto complejo según IPMA y aplicado a proyectos hidroeléctricos .....	148
Tabla 4-7: Características de un proyecto complejo según Ammen y Jacob aplicado a un proyecto hidroeléctrico .....	151
Tabla 4-8: Incremento en el costo y en el plazo en proyectos de energía.....	155
Tabla 4-9: Prelación por incremento en el costo de proyectos hidroeléctricos con presa .....	155
Tabla 4-10: Análisis de costos y plazos en la ejecución de proyectos hidroeléctricos en el Ecuador .....	162
Tabla 4-11: Matriz de comparación por pares para el proyecto hidroeléctrico Cardenillo .....	163

Tabla 4-12: Matriz de prioridades para el proyecto Cardenillo .....	164
Tabla 4-13: Pesos de los cuatro factores “K” para el proyecto Cardenillo .....	164
Tabla 4-14: Matriz de comparación por pares para el proyecto hidroeléctrico Mazar Dudas .....	165
Tabla 4-15: Matriz de prioridades para el proyecto Mazar Dudas .....	165
Tabla 4-16: Pesos de los cuatro factores K para el proyecto Mazar Dudas .....	166
Tabla 4-17: Matriz de comparación por pares para el proyecto hidroeléctrico Sopladora .....	166
Tabla 4-18: Matriz de prioridades para el proyecto Sopladora .....	167
Tabla 4-19: Pesos de los cuatro factores K para el proyecto Sopladora .....	167
Tabla 4-20: Matriz de comparación por pares para el proyecto hidroeléctrico Santiago .....	168
Tabla 4-21: Matriz de prioridades para el proyecto Santiago .....	168
Tabla 4-22: Pesos de los cuatro factores K para el proyecto Santiago .....	168
Tabla 4-23: Resultados consolidados de los factores K de los cuatro proyectos analizados .....	169
Tabla 4-24: Probabilidades de ajuste en el pronóstico del costo para el proyecto Cardenillo .....	173
Tabla 4-25: Probabilidades de ajuste en el pronóstico del costo para el proyecto Mazar Dudas .....	183
Tabla 4-26: Probabilidades de ajuste en el pronóstico del costo para el proyecto Sopladora .....	191

Tabla 4-27: Probabilidades de ajuste en el pronóstico del costo para el proyecto Santiago.....	200
Tabla 4-28: Datos de costos y plazos totales resultado de la simulación para el proyecto Cardenillo .....	208
Tabla 4-29: Meses de retraso estimados según EVM y CTCR en los periodos iniciales de ejecución del proyecto Cardenillo .....	209
Tabla 4-30: Meses de retraso estimados con EVM en los últimos meses previo a la conclusión para el proyecto hidroeléctrico Cardenillo .....	209
Tabla 4-31: Meses de retraso estimados con CTCR en los últimos meses previo a la conclusión para el proyecto hidroeléctrico Cardenillo .....	210
Tabla 4-32: Intervalos de confianza de Bonferroni de 95% para desviaciones estándar para EVM para el proyecto Cardenillo.....	212
Tabla 4-33: Resultados de las pruebas de comparaciones múltiples y Levene para EVM. Proyecto Cardenillo.....	213
Tabla 4-34: Intervalos de confianza de Bonferroni de 95% para desviaciones estándar para CTCR. Proyecto Cardenillo.....	215
Tabla 4-35: Resultados de las pruebas de comparaciones múltiples y Levene para CTCR. Proyecto Cardenillo .....	215
Tabla 4-36: Información del facto para EVM del proyecto Cardenillo.....	218
Tabla 4-37: Resultados de la prueba de Welch para EVM. Proyecto Cardenillo .....	218
Tabla 4-38: Resultados del análisis de medias y su IC para EVM. Proyecto Cardenillo .....	219

Tabla 4-39: Agrupación de datos utilizando el método de Games-Howell y una confianza de 95% para EVM. Proyecto Cardenillo .....	220
Tabla 4-40: Pruebas simultáneas de Games-Howell para diferencias de las medias para EVM. Proyecto Cardenillo .....	221
Tabla 4-41: Información del facto para CTCR. Proyecto Cardenillo.....	226
Tabla 4-42: Resultados de la prueba de Welch para CTCR. Proyecto Cardenillo .....	227
Tabla 4-43: Resultados del análisis de medias y su IC para CTCR. Proyecto Cardenillo .....	227
Tabla 4-44: Agrupación de datos utilizando el método de Games-Howell y una confianza de 95% para CTCR. Proyecto Cardenillo.....	228
Tabla 4-45: Pruebas simultáneas de Games-Howell para diferencias de las medias para CTCR. Proyecto Cardenillo .....	229
Tabla 4-46: Datos de costos y plazos totales resultado de la simulación para el proyecto Mazar Dudas .....	234
Tabla 4-47: Meses de retraso estimados según EVM y CTCR en los periodos iniciales de ejecución del proyecto Mazar Dudas .....	234
Tabla 4-48: Meses de retraso estimados con EVM en los últimos meses previo a la conclusión del proyecto Mazar Dudas.....	235
Tabla 4-49: Meses de retraso estimados con CTCR en los últimos meses previo a la conclusión del proyecto Mazar Dudas.....	235
Tabla 4-50: Intervalos de confianza de Bonferroni de 95% para desviaciones estándar para EVM. Proyecto Mazar Dudas .....	237

Tabla 4-51: resultados de las pruebas EVM para Mazar Dudas .....	238
Tabla 4-52: Intervalos de confianza de Bonferroni de 95% para desviaciones estándar para CTCR. Proyecto Mazar Dudas.....	240
Tabla 4-53: Resultados de las pruebas CTCR para Mazar Dudas.....	240
Tabla 4-54: Información del facto para EVM. Proyecto Mazar Dudas .....	242
Tabla 4-55: Resultados de la prueba de Welch para EVM. Proyecto Mazar Dudas .....	243
Tabla 4-56: Resultados del análisis de medias y su IC para EVM. Proyecto Mazar Dudas .....	243
Tabla 4-57: Agrupación de datos utilizando el método de Games-Howell y una confianza de 95% para EVM. Proyecto Mazar Dudas .....	244
Tabla 4-58: Pruebas simultáneas de Games-Howell para diferencias de las medias para EVM. Proyecto Mazar Dudas.....	245
Tabla 4-59: Información del facto para CTCR. Proyecto Mazar Dudas.....	249
Tabla 4-60: Resultados de la prueba de Welch CTCR. Proyecto Mazar Dudas	249
Tabla 4-61: Resultados del análisis de medias y su IC para CTCR. Proyecto Mazar Dudas .....	250
Tabla 4-62: Agrupación de datos utilizando el método de Games-Howell y una confianza de 95% para CTCR. Proyecto Mazar Dudas.....	251
Tabla 4-63: Pruebas simultáneas de Games-Howell para diferencias de las medias para CTCR. Proyecto Mazar Dudas .....	252
Tabla 4-64: Datos de costos y plazos totales resultado de la simulación para el proyecto Sopladora.....	255

Tabla 4-65: Meses de retraso estimados según EVM y CTCR en los periodos iniciales de ejecución del proyecto Sopladora .....	255
Tabla 4-66: Meses de retraso estimados con EVM en los últimos meses previo a la conclusión del proyecto Sopladora.....	256
Tabla 4-67: Meses de retraso estimados con CTCR en los últimos meses previo a la conclusión del proyecto Sopladora.....	256
Tabla 4-68: Intervalos de confianza de Bonferroni de 95% para desviaciones estándar para EVM. Proyecto Sopladora .....	259
Tabla 4-69: Resultados de las pruebas EVM. Proyecto Sopladora.....	259
Tabla 4-70: Intervalos de confianza de Bonferroni de 95% para desviaciones estándar para CTCR. Proyecto Sopladora .....	262
Tabla 4-71: Resultados de las pruebas CTCR. Proyecto Sopladora .....	262
Tabla 4-72: Información del facto para EVM. Proyecto Sopladora .....	265
Tabla 4-73: Resultados de la prueba de Welch para EVM. Proyecto Sopladora .....	266
Tabla 4-74: Resultados del análisis de medias y su IC para EVM. Proyecto Sopladora.....	266
Tabla 4-75: Agrupación de datos utilizando el método de Games-Howell y una confianza de 95% para EVM. Proyecto Sopladora .....	267
Tabla 4-76: Pruebas simultáneas de Games-Howell para diferencias de las medias para EVM. Proyecto Sopladora.....	267
Tabla 4-77: Información del factor para CTCR. Proyecto Sopladora.....	272
Tabla 4-78: Resultados de la prueba de Welch CTCR. Proyecto Sopladora.....	272

Tabla 4-79: Resultados del análisis de medias y su IC para CTCR. Proyecto Sopladora .....	273
Tabla 4-80: Agrupación de datos utilizando el método de Games-Howell y una confianza de 95% para CTCR. Proyecto Sopladora .....	274
Tabla 4-81: Pruebas simultáneas de Games-Howell para diferencias de las medias para CTCR. Proyecto Sopladora .....	275
Tabla 4-82: Datos de costos y plazos totales resultado de la simulación para el proyecto Santiago.....	278
Tabla 4-83: Meses de retraso estimados según EVM y CTCR en los periodos iniciales de ejecución del proyecto Santiago.....	279
Tabla 4-84: Meses de retraso estimados con EVM en los últimos meses previo a la conclusión del proyecto Santiago .....	279
Tabla 4-85: Meses de retraso estimados con CTCR en los últimos meses previo a la conclusión del proyecto Santiago .....	280
Tabla 4-86: Intervalos de confianza de Bonferroni de 95% para desviaciones estándar para EVM. Proyecto Santiago.....	282
Tabla 4-87: Resultados de las pruebas EVM. Proyecto Santiago .....	283
Tabla 4-88: Intervalos de confianza de Bonferroni de 95% para desviaciones estándar para CTCR. Proyecto Santiago .....	285
Tabla 4-89: Resultados de las pruebas CTCR. Proyecto Santiago .....	285
Tabla 4-90: Información del facto para EVM. Proyecto Santiago.....	288
Tabla 4-91: Resultados de la prueba de Welch para EVM. Proyecto Santiago .	289

Tabla 4-92: Resultados del análisis de medias y su IC para EVM. Proyecto Santiago.....	289
Tabla 4-93: Agrupación de datos utilizando el método de Games-Howell y una confianza de 95% para EVM. Proyecto Santiago.....	290
Tabla 4-94: Pruebas simultáneas de Games-Howell para diferencias de las medias para EVM. Proyecto Santiago .....	291
Tabla 4-95: Información del facto para CTCR. Proyecto Santiago .....	297
Tabla 4-96: Resultados de la prueba de Welch CTCR. Proyecto Santiago .....	297
Tabla 4-97: Resultados del análisis de medias y su IC para CTCR. Proyecto Santiago.....	297
Tabla 4-98: Agrupación de datos utilizando el método de Games-Howell y una confianza de 95% para CTCR. Proyecto Santiago .....	298
Tabla 4-99: Pruebas simultáneas de Games-Howell para diferencias de las medias para CTCR. Proyecto Santiago.....	299
Tabla 4-100: Probabilidades de ajuste entre costo planificado y costo de simulación para el caso de estudio de la metodología del Cronograma Valorado .....	310
Tabla 5-1: Predicción efectiva del plazo a la conclusión del proyecto aplicando los métodos CTCR y EVM .....	320

# Lista de figuras

Figura 2-1: Curva S de Costo-Tiempo que utiliza como base el método del Cronograma Valorado.....	31
Figura 2-2: Avance planificado según ejemplo de la Tabla 2-3.....	33
Figura 2-3: Ejemplo de avance planificado vs. Costos ejecutados presentados en %.....	34
Figura 2-4: Semaforización de alertas en presupuestos según GPR.....	36
Figura 2-5: Gráfica de proyección de costos según GPR.....	36
Figura 2-6: Alertas en avance físico según GPR.....	38
Figura 2-7: Gráfica Costo-Tiempo con las principales variables de las técnicas EVM y Cronograma Ganado.....	43
Figura 2-8: Ejemplo de planificación de costos –línea base (PV).....	44
Figura 2-9: Ejemplo de Costos Planificados (PV) y Costos Realmente Ejecutados (AC).....	45
Figura 2-10: Valor Planificado (PV), Costo actual (AC) y Valor Ganado (EV) del ejemplo.....	46
Figura 2-11: ejemplo gráfico del análisis del Cronograma Ganado.....	51
Figura 2-12: Curva “S” del avance de un proyecto hidroeléctrico en el Ecuador.....	53
Figura 2-13: Esquema de Estructura de Desglose de Trabajo EDT.....	56

Figura 2-14: Modelo de Cronograma Valorado de trabajo establecido en el modelo de pliego de contratación de obras del Sistema Nacional de Contratación Pública del Ecuador .....	65
Figura 3-1: Proyección del tiempo .....	84
Figura 3-2: Estructura de modelo de decisión AHP para factores K .....	87
Figura 3-3: Construcción de la Línea Base del Avance Físico del ejemplo.....	96
Figura 3-4: Composición de la Línea Base del Avance Presupuestario del proyecto ejemplo.....	97
Figura 3-5: Composición de la Línea Base del Avance de Ruta Crítica del proyecto ejemplo.....	99
Figura 3-6: Comparación de la Línea Base Vs el Avance Físico Real del proyecto ejemplo.....	102
Figura 3-7: Comparación de la Línea Base Presupuestario comparado con el Avance Presupuestario Real del proyecto-ejemplo .....	104
Figura 3-8: Comparación de la Línea Base Presupuestario comparado con el Avance Presupuestario Real del proyecto-ejemplo .....	105
Figura 3-9: Proyección de tiempo estimado de retraso en el ejemplo básico....	108
Figura 3-10: Diagrama de un modelo de simulación.....	111
Figura 3-11: Esquema de cronograma con variabilidad en duración y costo ...	116
Figura 3-12: Cronograma resumen del proyecto hidroeléctrico Cardenillo .....	119
Figura 3-13: Cronograma resumen del proyecto hidroeléctrico Mazar Dudas	121
Figura 3-14: Cronograma resumen del proyecto hidroeléctrico Sopladora.....	123

Figura 3-15: Cronograma resumen del proyecto hidroeléctrico Santiago.....	125
Figura 3-16: Cronograma valorado del proyecto hidroeléctrico Cardenillo.....	126
Figura 3-17: Cronograma con detalle del tiempo acumulado del proyecto hidroeléctrico Cardenillo.....	127
Figura 3-18: Cronograma con detalle del tiempo acumulado de actividades en ruta crítica del proyecto hidroeléctrico Cardenillo .....	128
Figura 3-19: Cronograma con detalle del tiempo acumulado de actividades en ruta crítica del proyecto hidroeléctrico Cardenillo .....	130
Figura 3-20: Muestra de indicadores de las metodologías EVM y CTCR en el modelo del proyecto Cardenillo .....	134
Figura 3-21: Pantalla de muestra de la corrida del modelo de simulación .....	135
Figura 4-1: Ubicación geográfica de los proyectos hidroeléctricos en la república del Ecuador.....	139
Figura 4-2: S-Curvas que representan las líneas base de los proyectos en análisis. La escala secundaria representa exclusivamente los costos para el proyecto Mazar Dudas.....	141
Figura 4-3: Proyección de la demanda máxima de potencia en el Ecuador.....	144
Figura 4-4: Histograma de costos totales del proyecto Cardenillo con una probabilidad al costo planificado inicial .....	171
Figura 4-5: Histograma de costos totales del proyecto Cardenillo con una probabilidad del 95%.....	171
Figura 4-6: Histograma de plazos totales del proyecto Cardenillo con una probabilidad al plazo planificado inicial .....	172

Figura 4-7: Histograma del plazo total del proyecto Cardenillo con una probabilidad del 95%..... 172

Figura 4-8: Ajuste del método al pronóstico del plazo final en los 10 meses de ejecución del proyecto Cardenillo. (a) Método EVM. (b) Metodología CTCR. 174

Figura 4-9: Ajuste del método al pronóstico del plazo final en los 20 meses de ejecución del proyecto Cardenillo. (a) Método EVM. (b) Metodología CTCR. 175

Figura 4-10: Ajuste del método al pronóstico del plazo final en los 30 meses de ejecución del proyecto Cardenillo. (a) Método EVM. (b) Metodología CTCR. 175

Figura 4-11: Ajuste del método al pronóstico del plazo final en los 40 meses de ejecución del proyecto Cardenillo. (a) Método EVM. (b) Metodología CTCR. 175

Figura 4-12: Ajuste del método al pronóstico del plazo final en los 50 meses de ejecución del proyecto Cardenillo. (a) Método EVM. (b) Metodología CTCR. 176

Figura 4-13: Ajuste del método al pronóstico del plazo final en los 60 meses de ejecución del proyecto Cardenillo. (a) Método EVM. (b) Metodología CTCR. 176

Figura 4-14: Ajuste del método al pronóstico del plazo final en el mes 10 antes de la conclusión del proyecto Cardenillo. (a) Método EVM. (b) Metodología CTCR.  
..... 177

Figura 4-15: Ajuste del método al pronóstico del plazo final en el mes 8 antes de la conclusión del proyecto Cardenillo. (a) Método EVM. (b) Metodología CTCR  
..... 177

Figura 4-16: Ajuste del método al pronóstico del plazo final en el mes 6 antes de la conclusión del proyecto Cardenillo. (a) Método EVM. (b) Metodología CTCR  
..... 177

Figura 4-17: Ajuste del método al pronóstico del plazo final en el mes 1 antes de la conclusión del proyecto Cardenillo. (a) Método EVM. (b) Metodología CTCR ..... 178

Figura 4-18: Evolución de La probabilidad de ajuste de los métodos EVM y CTCR al pronóstico del plazo final del proyecto hidroeléctrico Cardenillo ..... 178

Figura 4-19: Histograma de costos totales del proyecto Mazar Dudas con una probabilidad al costo planificado inicial ..... 180

Figura 4-20: Histograma de costos totales del proyecto Mazar Dudas con una probabilidad del 95%..... 180

Figura 4-21: Histograma de plazos totales del proyecto Mazar Dudas con una probabilidad al plazo planificado inicial ..... 181

Figura 4-22: Histograma del plazo total del proyecto Mazar Dudas con una probabilidad del 95%..... 182

Figura 4-23: Ajuste del método al pronóstico del plazo final en los 5 meses de ejecución del proyecto Mazar Dudas. (a) Método EVM. (b) Metodología CTCR. .... 184

Figura 4-24: Ajuste del método al pronóstico del plazo final en los 10 meses de ejecución del proyecto Mazar Dudas. (a) Método EVM. (b) Metodología CTCR ..... 184

Figura 4-25: Ajuste del método al pronóstico del plazo final en los 15 meses de ejecución del proyecto Mazar Dudas. (a) Método EVM. (b) Metodología CTCR ..... 184

Figura 4-26: Ajuste del método al pronóstico del plazo final en el mes 10 antes de la conclusión del proyecto Mazar Dudas. (a) Método EVM. (b) Metodología CTCR..... 185

Figura 4-27: Ajuste del método al pronóstico del plazo final en el mes 8 antes de la conclusión del proyecto Mazar Dudas. (a) Método EVM. (b) Metodología CTCR..... 185

Figura 4-28: Ajuste del método al pronóstico del plazo final en el mes 6 antes de la conclusión del proyecto Mazar Dudas. (a) Método EVM. (b) Metodología CTCR..... 186

Figura 4-29: Ajuste del método al pronóstico del plazo final en el mes 1 antes de la conclusión del proyecto Mazar Dudas. (a) Método EVM. (b) Metodología CTCR..... 186

Figura 4-30: Evolución de La probabilidad de ajuste de los métodos EVM y CTCR al pronóstico del plazo final del proyecto hidroeléctrico Mazar Dudas ..... 187

Figura 4-31: Histograma de costos totales del proyecto hidroeléctrico Sopladora, con una probabilidad al costo planificado inicial..... 189

Figura 4-32: Histograma de costos totales del proyecto hidroeléctrico Sopladora, con una probabilidad del 95% ..... 189

Figura 4-33: Histograma de plazos totales del proyecto hidroeléctrico Sopladora, con una probabilidad al plazo planificado inicial ..... 190

Figura 4-34: Histograma del plazo total del proyecto hidroeléctrico Sopladora, con una probabilidad del 95% ..... 190

Figura 4-35: Ajuste del método al pronóstico del plazo final en los 10 meses de ejecución del proyecto Sopladora. (a) Método EVM. (b) Metodología CTCR.. 192

Figura 4-36: Ajuste del método al pronóstico del plazo final en los 20 meses de ejecución del proyecto Sopladora. (a) Método EVM. (b) Metodología CTCR.. 192

Figura 4-37: Ajuste del método al pronóstico del plazo final en los 30 meses de ejecución del proyecto Sopladora. (a) Método EVM. (b) Metodología CTCR.. 193

Figura 4-38: Ajuste del método al pronóstico del plazo final en los 35 meses de ejecución del proyecto Sopladora. (a) Método EVM. (b) Metodología CTCR.. 193

Figura 4-39: Ajuste del método al pronóstico del plazo final en el mes 10 antes de la conclusión del proyecto Sopladora. (a) Método EVM. (b) Metodología CTCR ..... 194

Figura 4-40: Ajuste del método al pronóstico del plazo final en el mes 8 antes de la conclusión del proyecto Sopladora. (a) Método EVM. (b) Metodología CTCR ..... 194

Figura 4-41: Ajuste del método al pronóstico del plazo final en el mes 5 antes de la conclusión del proyecto Sopladora. (a) Método EVM. (b) Metodología CTCR ..... 194

Figura 4-42: Ajuste del método al pronóstico del plazo final en el mes 1 antes de la conclusión del proyecto Sopladora. (a) Método EVM. (b) Metodología CTCR ..... 195

Figura 4-43: Evolución de La probabilidad de ajuste de los métodos EVM y CTCR al pronóstico del plazo final del proyecto hidroeléctrico Sopladora..... 195

Figura 4-44: Histograma de costos totales del proyecto Santiago con una probabilidad al costo planificado inicial ..... 197

Figura 4-45: Histograma de costos totales del proyecto Santiago con una probabilidad del 95%..... 197

Figura 4-46: Histograma de plazos totales del proyecto Santiago con una probabilidad al plazo planificado inicial ..... 198

Figura 4-47: Histograma de costos totales del proyecto Santiago con una probabilidad del 95%..... 199

Figura 4-48: Ajuste del método al pronóstico del plazo final en los 10 meses de ejecución del proyecto Santiago. (a) Método EVM. (b) Metodología CTCR..... 201

Figura 4-49: Ajuste del método al pronóstico del plazo final en los 20 meses de ejecución del proyecto Santiago. (a) Método EVM. (b) Metodología CTCR..... 201

Figura 4-50: Ajuste del método al pronóstico del plazo final en los 30 meses de ejecución del proyecto Santiago. (a) Método EVM. (b) Metodología CTCR..... 201

Figura 4-51: Ajuste del método al pronóstico del plazo final en los 40 meses de ejecución del proyecto Santiago. (a) Método EVM. (b) Metodología CTCR..... 202

Figura 4-52: Ajuste del método al pronóstico del plazo final en los 50 meses de ejecución del proyecto Santiago. (a) Método EVM. (b) Metodología CTCR..... 202

Figura 4-53: Ajuste del método al pronóstico del plazo final en los 60 meses de ejecución del proyecto Santiago. (a) Método EVM. (b) Metodología CTCR..... 202

Figura 4-54: Ajuste del método al pronóstico del plazo final en el mes 10 antes de la conclusión del proyecto Santiago. (a) Método EVM. (b) Metodología CTCR ..... 203

Figura 4-55: Ajuste del método al pronóstico del plazo final en el mes 8 antes de la conclusión del proyecto Santiago. (a) Método EVM. (b) Metodología CTCR ..... 203

Figura 4-56: Ajuste del método al pronóstico del plazo final en el mes 5 antes de la conclusión del proyecto Santiago. (a) Método EVM. (b) Metodología CTCR ..... 204

Figura 4-57: Ajuste del método al pronóstico del plazo final en el mes 2 antes de la conclusión del proyecto Santiago. (a) Método EVM. (b) Metodología CTCR ..... 204

Figura 4-58: Ajuste del método al pronóstico del plazo final en el mes 1 antes de la conclusión del proyecto Santiago. (a) Método EVM. (b) Metodología CTCR ..... 204

Figura 4-59: Evolución de La probabilidad de ajuste de los métodos EVM y CTCR al pronóstico del plazo final del proyecto hidroeléctrico Santiago..... 205

Figura 4-60: Gráfica de caja de las variables para EV. Proyecto Cardenillo ..... 211

Figura 4-61: Gráfica de caja de las variables para CTCR. Proyecto Cardenillo 214

Figura 4-62: Gráficas de residuos para EMV del proyecto Cardenillo..... 217

Figura 4-63: Gráfica de intervalos para EMV- 95% IC para la media. Proyecto Cardenillo ..... 217

Figura 4-64: Gráficas de residuos para CTCR. Proyecto Cardenillo..... 225

Figura 4-65: Gráfica de intervalos para CTCR- 95% IC para la media. Proyecto Cardenillo ..... 226

Figura 4-66: Gráfica de caja de las variables para EVM del proyecto Mazar Dudas ..... 237

Figura 4-67: Gráfica de caja de las variables para CTCR para el proyecto Mazar Dudas ..... 239

Figura 4-68: Gráficas de residuos para EMV de Mazar Dudas ..... 241

Figura 4-69: Gráfica de intervalos para EMV- 95% IC para la media. Proyecto Mazar Dudas ..... 242

Figura 4-70: Gráficas de residuos para CTCR. Proyecto Mazar Dudas..... 248

Figura 4-71: Gráfica de intervalos para CTCR- 95% IC para la media. Proyecto Mazar Dudas ..... 248

Figura 4-72: Gráfica de caja de las variables para EVM del proyecto Sopladora ..... 258

Figura 4-73: Gráfica de caja de las variables para CTCR para el proyecto Sopladora ..... 261

Figura 4-74: Gráficas de residuos para EMV. Proyecto Sopladora ..... 264

Figura 4-75: Gráfica de intervalos para EMV- 95% IC para la media. Proyecto Sopladora ..... 265

Figura 4-76: Gráficas de residuos para CTCR. Proyecto Sopladora ..... 271

Figura 4-77: Gráfica de intervalos para CTCR Sopladora- 95% IC para la media. Proyecto Sopladora ..... 271

Figura 4-78: Gráfica de caja de las variables para EVM del proyecto Santiago 281

Figura 4-79: Gráfica de caja de las variables para CTCR para el proyecto Santiago ..... 284

Figura 4-80: Gráficas de residuos para EMV. Proyecto Santiago..... 287

Figura 4-81: Gráfica de intervalos para EMV- 95% IC para la media. Proyecto Santiago..... 288

Figura 4-82: Gráficas de residuos para CTCR. Proyecto Santiago ..... 295

Figura 4-83: Gráfica de intervalos para CTCR Santiago- 95% IC para la media.  
Proyecto Santiago..... 296

Figura 4-84: Cronograma de caso de estudio para el método Cronograma  
Valorado con distribución de duración y costo para cada actividad ..... 304

Figura 4-85: Curva "S" Costo Planificado- Tiempo para el caso de estudio del  
método Cronograma Valorado..... 305

Figura 4-86: Probabilidad de ocurrencia de la duración final del caso de estudio  
de la metodología del Cronograma Valorado ..... 307

Figura 4-87: Probabilidad de ocurrencia del costo final del caso de estudio de la  
metodología del Cronograma Valorado ..... 307

Figura 4-88: Probabilidades de la relación Costo-Duración para el caso de estudio  
de la metodología del Cronograma Valorado ..... 308

Figura 4-89: Probabilidades de ajuste entre el costo planificado y el costo de  
simulación para el caso de estudio de la metodología del Cronograma Valorado  
..... 309

Figura 4-90: Curva Duración- Costo Planificado en relación al Ejecutado (%) para  
el caso de estudio de la metodología del Cronograma Valorado ..... 310

Figura 5-1: Ajuste del pronóstico de costos en el transcurso del tiempo de  
ejecución de los proyectos de los casos de estudio ..... 317

Figura 5-2: Ajuste de la predicción de la duración con Earned Schedule de EVM  
en el transcurso del tiempo de ejecución de los proyectos de los casos de estudio.  
..... 318

# Abreviaturas

PMI.- Project Management Institute.

PMBOK.- Guide to the Project Management Body of Knowledge, o Guía de los fundamentos para la dirección de proyectos

IPMA.- International project Management Association.

PMO.- Oficina de dirección de proyectos.

CII.- Instituto de la Industria de la Construcción.

GPR.- Metodología Gobierno por Resultados.

EVM.- Técnica Earned Value Management o técnica de la Administración del Valor Ganado.

ES.- Earned Schedule o Cronograma Ganado, es una técnica extensión de EVM.

CTCR.- Metodología desarrollada en esta Tesis Doctoral que involucra Costo, Tiempo, Criticidad y Riesgos.

DoD.- Departamento de Defensa de los Estados Unidos.

SERCOP.- Sistema Nacional de Contratación Pública de la República del Ecuador.

CPM.- Critical Path Method.

PERT.- Program Evaluation and Review Technique.

AHP.- Analytical Hierachy process o proceso analítico jerárquico de decisión.

MW.- Mega Watts, unidades de medida de potencia instalada de centrales hidroeléctricas.

@RISK.- Software especializado para simulación y aplicación de la teoría de la probabilidad.

Minitab.- Software especializado para uso de herramientas estadísticas.

# Capítulo 1 Introducción

## 1.1 Antecedentes de la investigación

Un proyecto de construcción complejo, está constituido por muchos componentes interrelacionados e interdependientes. Los componentes que conforman estos proyectos obedecen a varias disciplinas de la ingeniería, tales como: eléctrica, electrónica, civil, mecánica, industrial, ambiental, entre otras. Un proyecto complejo se considera como un sistema dinámico que se desarrolla en un entorno de gran incertidumbre e imprevisibilidad [1] [2].

Identificar y gestionar adecuadamente la complejidad de un proyecto en sus etapas más tempranas, es un factor crítico para el éxito del proyecto [3] [4]. Esta responsabilidad suele estar a cargo de la oficina de Seguimiento y Control dentro de la estructura organizacional del proyecto. La ejecución de las tareas de seguimiento y de control, tienen como objetivo monitorizar el desempeño del proyecto, así como de obtener las proyecciones y las medidas que permitan anticipar posibles desviaciones en la planificación [5]. Un proyecto que cuenta con una planificación adecuada en términos de: presupuesto, suministros, financiamiento, contratos, entre otros, facilita la tarea del control de la ejecución del proyecto [6].

La gestión del cronograma y de los costos, están estrechamente ligadas a las tareas de seguimiento y control de un proyecto. Como lo establece la Guía del PMBOK® [7], las actividades de control del cronograma son de apoyo fundamental a los procesos requeridos para administrar la finalización del

proyecto a tiempo; y de la misma forma, las actividades de control de los costos son parte esencial de los proceso que permiten que se complete el proyecto dentro del presupuesto aprobado [8] [9].

En este contexto, la construcción de grandes centrales hidroeléctricas, dentro del sector hidroenergético, se consideran proyectos de gran complejidad, y la evidencia internacional así lo demuestra, al presentarse estadísticas con desviaciones de importante cuantía en cuanto a costos y plazos reales de construcción en comparación con los costos y plazos planificados. A estas desviaciones incrementales del costo y del plazo se las denominan como sobrecostos y sobreplazos respectivamente.

Existen diversas técnicas, metodologías y herramientas que brindan apoyo a las tareas de seguimiento y control de los proyectos. La presente Tesis Doctoral revisa un grupo de técnicas y metodologías con extensa aplicación en la gestión de proyectos, y concluye proponiendo una metodología propia con aplicación exclusiva para proyectos complejos de construcción verificando su eficiencia en casos de estudio dentro del sector hidroenergético.

## 1.2 Problema de investigación

Los problemas principales tratados en la investigación de esta Tesis Doctoral son:

- ¿Son eficientes los métodos o técnicas tradicionales de seguimiento y control de proyectos para su aplicación en un proyecto complejo de construcción?
- ¿Es posible el desarrollo de una metodología de seguimiento y control de proyectos que permita mejorar la eficiencia de las metodologías tradicionales al ser aplicada en proyectos complejos de construcción?

Esencialmente, en esta Tesis Doctoral se argumenta que las técnicas tradicionales de seguimiento y control de proyectos no son aplicables en su totalidad para un proyecto complejo de construcción, sin embargo, sí es posible desarrollar una metodología que permita mejorar la eficiencia en las métricas de avance físico – financiero y en las predicciones de los costos y plazos a la conclusión de un proyecto complejo de construcción.

Se finaliza proponiendo nuevas líneas futuras de investigación dentro del marco de la investigación central de esta Tesis Doctoral.

### 1.3 Justificación de la investigación

La Republica del Ecuador, ubicada en la costa noroccidental de América del Sur, emprendió en el año 2007 el gran reto de expandir el sector eléctrico del país, dentro de sus políticas de dinamizar y mejorar su sector productivo. En este contexto, enfrentó la construcción simultánea de al menos quince centrales hidroeléctricas, a la fecha, de las cuales unas están concluidas y otras se encuentran en etapa de construcción. Adicional, dentro de su planificación inmediata, se prevé la construcción de nuevas centrales hidroeléctricas.

Esta primera experiencia en la gestión de la construcción de grandes centrales hidroeléctricas, ha evidenciado desviaciones importantes en cuanto a sobrecostos y sobreplazos durante su ejecución. Sin embargo, de la investigación que realiza esta Tesis Doctoral, existen estudios que demuestran que esta tendencia no es ajena al comportamiento de este tipo de proyectos a nivel mundial.

Un estudio realizado por la universidad de Oxford [10], donde se analiza una muestra de 235 proyectos hidroeléctricos, llegó a resultados sorprendentes. Con un percentil 80, los costos de ejecución de los proyectos se incrementan en un 99% de los costos inicialmente planificados, con una media de 90%. Las desviaciones en plazo real ejecutado, presentan retrasos de un 44% en comparación con el plazo planificado.

Según el Institute for Energy & the Environment [11], basados en una muestra de 401 proyectos de energía, de los cuales 61 corresponden a proyectos hidroeléctricos, concluyen que existe un incremento en los costos planificados promedio de US\$ 2.437,0 millones, representando un incremento promedio del 70,6% sobre el presupuesto inicial. Así mismo, el estudio indica que existe un incremento promedio del plazo de los proyectos hidroeléctricos de 43.2 meses.

El estudio realizado por Awojobi y Jenkins [12], analizó aspectos de costos de una muestra de 58 proyectos con presas, que fueron financiados por el Banco Mundial en el periodo de 1976 a 2005. Este estudio concluye que existe un incremento promedio de costo del 27% con una desviación estándar de 34,7%.

Frente a esta realidad, y considerando que esta tendencia obedece a un sin número de factores internos y externos al propio proyecto, también es evidente la importancia que representan las herramientas y metodologías empleadas en la gestión de la ejecución de este tipo de proyectos, con el objetivo primordial de obtener y disponer de las métricas adecuadas del avance y pronósticos del proyecto en términos del costo y plazos.

Frente a la necesidad de mejorar la gestión de los proyectos complejos de construcción que se planifican construirse a corto plazo dentro del sector hidroeléctrico en la República del Ecuador, sobre todo en términos de evitar sobrecostos y/o sobreplazos, el justificativo principal de la investigación de esta Tesis Doctoral radica en un análisis de las metodologías tradicionales más importantes en materia de seguimiento y control de proyectos, como herramientas a ser aplicadas en proyectos complejos de construcción, y proponer una metodología propia que permita mejorar la eficiencia en términos de medición de avance físico- financiero y predicciones de costos y plazos a la conclusión de los proyectos.

## 1.4 Metodología

La principal metodología que sustenta la investigación de esta Tesis Doctoral es la construcción y desarrollo de modelos estocásticos de simulación aplicados a proyectos complejos de construcción.

La incertidumbre en la que se encuentra inmerso un proyecto complejo de construcción, hace que su planificación sea obligatoriamente dinámica y cambiante en el transcurso del tiempo. En ese contexto, un modelo de simulación es una herramienta poderosa que permite estudiar de manera virtual el comportamiento real del proyecto. Un buen modelo de simulación permite representar, conocer y predecir propiedades de la planificación y de los cronogramas del proyecto [13] [14]. Además, se tiene que considerar que el desarrollo del cronograma tiene influencia significativa en la gestión de un proyecto [15].

La investigación considera cuatro proyectos complejos de construcción en el sector hidroenergético. Para todos ellos se construyeron modelos estocásticos, en los que se definieron como variables aleatorias el costo y la duración de las tareas que conforman sus respectivos cronogramas. Los proyectos utilizados son casos reales de centrales hidroeléctricas en la República del Ecuador.

A través del uso de métodos numéricos se realizaron simulaciones que permitieron calcular las probabilidades de ocurrencia del costo y de la duración a la conclusión de los proyectos. En cada simulación se aplicaron las técnicas del EVM y la metodología propia desarrollada en esta Tesis Doctoral, realizando un análisis de eficiencia de estas técnicas en cuanto al pronóstico del costo y de la duración.

Como metodologías de apoyo en la investigación de esta Tesis Doctora se tienen:

- Desarrollo de un modelo de decisión Analytical Hierachy Process (AHP) que permite ponderar el peso de afectación de cada componente: Costo, Tiempo, Criticidad y Riesgos en la metodología de seguimiento y control propuesta en esta Tesis Doctoral.
- Análisis ANOVA para verificar estadísticamente la eficiencia de la metodología propuesta por esta Tesis Doctoral y compararla con EVM.

Los modelos fueron desarrollados en Microsoft Excel utilizando el programa @Risk de Palisade [16]. Este software permite la utilización de técnicas de simulación Monte Carlo, pudiendo generar distribuciones de posibles resultados de cualquier celda o rango de celdas del modelo de la hoja de cálculo [17]. La

decisión de usar @Risk para el presente trabajo, se fundamentó en la experiencia de su empresa desarrolladora en mantener al programa en el mercado desde 1987, actualmente con más de 150.000 usuarios en más de 100 países del mundo y con traducción a siete idiomas. Para el tratamiento y análisis estadísticos se utilizó el software especializado Minitab V18.

## 1.5 Esquema general de la Tesis Doctoral

Aparte de este capítulo introductorio, esta Tesis Doctoral presenta cuatro capítulos que se resumen a continuación:

- En el Capítulo 2 se presenta el Estado del Arte de esta investigación. Su desarrollo destaca dos partes fundamentales:
  - La primera parte desarrolla los conceptos principales de la dirección de proyectos, abordando los temas: el seguimiento y control, y complejidad en proyectos de construcción.
  - En una segunda parte, se describen las principales metodologías, métodos y técnicas tradicionales existentes para realizar el seguimiento y control de proyectos. Se pueden destacar como técnicas tradicionales principales el Cronograma Ganado y EVM.
- La metodología que sustenta la investigación de esta Tesis Doctoral se presenta en el Capítulo 3. Se propone una metodología propia para el seguimiento y control de proyectos complejos de construcción. Esta metodología se basa en estándares y recomendaciones de instituciones con

gran trayectoria y experiencia a nivel mundial en materia de dirección de proyectos, como el Project Management Institute de los Estados Unidos de América, el International Project Management Association, y la Norma Internacional ISO 21500:2012.

En este capítulo se presenta un ejemplo básico con la aplicación de la metodología propuesta, con el objetivo de permitir una rápida comprensión, sobre todo considerando la complejidad numérica que representa su aplicación a un proyecto real. Este ejemplo básico resulta introductorio a la propia aplicación desarrollada en el Capítulo 4.

- El Capítulo 4, denominado “Aplicación en el sector hidroenergético” desarrolla la aplicación y verificación de la metodología CTCR propuesta por esta Tesis Doctoral a casos de estudio. Estos casos de estudio constituyen cuatro proyectos complejos de construcción en el sector hidroenergético. Los proyectos utilizados son casos reales de grandes centrales hidroeléctricas en la República del Ecuador.

Este capítulo presenta la aplicación y resultados estadísticos y numéricos de la investigación, verificando la eficiencia de la metodología de seguimiento y control propuesta por esta Tesis Doctoral, y a la vez comparándola con metodologías tradicionales en su aplicación a proyectos complejos de construcción en el sector hidroenergético. El Capítulo 4 se constituye como el más extenso de esta investigación.

- Esta Tesis Doctoral concluye con el Capítulo 5, presentando las conclusiones generales y particulares, con énfasis en dar contestación a las

interrogantes del problema de investigación planteado en este Capítulo 1. Finalmente, se concluye con el planteamiento de líneas futuras de investigación dentro de la temática que aborda esta Tesis Doctoral.

## Capítulo 2 Estado del Arte

### 2.1 Introducción

Este apartado revisa los principales conceptos de la Dirección de Proyectos propuestos en varios estudios y por organismos importantes en materia de dirección de proyectos a nivel mundial, como el Project Management Institute (PMI), International Project Management Association (IPMA) y la Norma Internacional ISO. Se abordan conceptos referentes a: monitoreo y control de proyectos, complejidad en proyectos, proyectos complejos de construcción, entre otros.

Parte de este apartado dedica una revisión de las principales metodologías, métodos y técnicas tradicionales existentes para el seguimiento y control de proyectos. Entre las principales técnicas y metodologías que se revisaron están: Earned Value Management (EVM), Cronograma Valorado, Last Planer, entre otras. Para las técnicas y métodos principales se presenta un ejemplo básico de su aplicación, con efecto de brindar una mayor comprensión de sus métricas y cálculos.

### 2.2 Dirección de proyectos

Previo a analizar el concepto de “dirección de proyectos”, es importante comenzar con la definición de “proyecto”. A continuación se revisan varios conceptos:

- Según el Project Management Institute PMI [18]: Un proyecto es un esfuerzo temporal que se lleva a cabo para crear un producto, servicio o resultado único.
- Según el International Project Management Association IPMA [19]: Un proyecto se define como un esfuerzo único, temporal, multidisciplinario y organizado para realizar entregables acordados dentro de los requisitos y limitaciones previamente definidos. El éxito del proyecto se define como la apreciación de los resultados del proyecto por parte de las diversas partes interesadas.
- Según la Norma Internacional ISO 21500:2012 [20]: Un proyecto es un conjunto único de procesos que consta de actividades coordinadas y controladas, con fechas de inicio y fin, que se llevan a cabo para lograr los objetivos del proyecto.
- Según Ammen y Jacob [21]: Se define un proyecto como un emprendimiento único con un comienzo y un final definitivos, habiendo establecido metas con parámetros de costo, cronograma y calidad.
- Según Sapag [22]: Un proyecto es, ni más ni menos, la búsqueda de una solución inteligente al planteamiento de un problema que tiende a resolver, entre tantos, una necesidad humana. Cualquiera que sea la idea que se pretende implementar, la inversión, la metodología o la tecnología por aplicar, ella conlleva necesariamente la búsqueda de proposiciones coherentes destinadas a resolver las necesidades humanas.
- Según Wikipedia: Un proyecto es un emprendimiento temporal diseñado a producir un único producto, servicio o resultado con un principio y un final definidos (normalmente limitado en tiempo, en costos y/o entregables), que es

emprendido para alcanzar objetivos únicos y que dará lugar a un cambio positivo o agregará valor.

De las definiciones revisadas, es coincidente que un proyecto tiene un objetivo o producto y una temporalidad.

La dirección de proyectos pretende alcanzar el objetivo o producto planteado en el proyecto, para lo cual equipo de proyecto tiene que gestionar las restricciones mínimas: el alcance, la calidad, el plazo y los costos. Por otra parte, la dirección de proyectos debe buscar la optimización de recursos.

A continuación se revisan varias definiciones de "dirección de proyectos":

- Según el Project Management Institute PMI [18]: La dirección de proyectos es la aplicación de conocimientos, habilidades, herramientas y técnicas a las actividades del proyecto para cumplir con los requisitos del mismo.
- Según la Norma Internacional ISO 21500:2012 [20]: La dirección y gestión de proyecto es la aplicación de métodos, herramientas, técnicas y competencias a un proyecto. La dirección y gestión de proyectos incluye la integración de las diversas fases del ciclo de vida del proyecto.
- Según Wikipedia: La gestión de proyectos es la disciplina del planeamiento, la organización, la motivación, y el control de los recursos con el propósito de alcanzar uno o varios objetivos.

De las definiciones revisadas, la dirección de proyectos gestiona emprendimientos finitos con objetivos específicos. Se utilizan la planificación, la gestión de recursos, la ejecución y el control para lograr los objetivos. El

conocimiento de los procesos de administración general es necesario, aunque no suficiente, para asegurar una administración exitosa de los proyectos.

Las principales características de la dirección de proyectos se detallan a continuación:

- a) La dirección es ejercida por el director de proyectos y su equipo de trabajo. Es director es el responsable de aplicar los conocimientos, habilidades, herramientas y técnicas. Esta persona debe poseer una serie de destrezas básicas y competencias en este campo.
- b) La dirección de proyectos persigue la consecución de unos objetivos concretos, establecidos con anterioridad.
- c) Se enfoca en gestionar los factores principales de los proyectos: alcance, plazos y costos.
- d) La dirección de proyectos se compone de diversos tipos de procesos, acciones y actividades interrelacionadas entre sí.
- e) La dirección de proyectos se apoya en las siguientes áreas de conocimiento [23]:
  - Gestión de la Integración.
  - Gestión del Alcance.
  - Gestión del Cronograma.
  - Gestión del Costo.
  - Gestión de la Calidad.
  - Gestión de los Recursos.
  - Gestión de las Comunicaciones.
  - Gestión de los Riesgos.

- Gestión de las Adquisiciones.
  - Gestión de los Interesados.
- f) La dirección de proyectos es un proceso dinámico y cambiante en el que las acciones se relacionan e influyen constantemente.

Una adecuada dirección de proyectos permite ejecutar proyectos de manera eficaz y eficiente, ayudando principalmente a [18]:

- Cumplir los objetivos
- Satisfacer las expectativas de los interesados
- Ser más predecibles
- Aumentar las posibilidades de éxito
- Entregar los productos adecuados en el momento adecuado
- Resolver problemas e incidentes
- Responder a los riesgos de manera oportuna
- Optimizar el uso de los recursos de la organización
- Identificar, recuperar o concluir proyectos fallidos
- Gestionar las restricciones
- Equilibrar la influencia de las restricciones en el proyecto
- Gestionar el cambio de una mejor manera

Una dirección de proyectos deficiente podría conducir a [18]:

- Incumplimiento de plazos
- Sobrecostos
- Calidad deficiente
- Re trabajo
- Expansión no controlada del proyecto
- Pérdida de reputación para la organización

- Interesados insatisfechos
- Incumplimiento de los objetivos propuestos del proyecto

La dirección de proyectos involucra 5 grupos de procesos [18] [20]:

- a) Procesos de inicio: Definición de objetivos, identificación de interesados, designación del director de proyecto, y formalidad de inicio del proyecto.
- b) Procesos de planificación: Definición del alcance del proyecto, revisión de objetivos; desarrollo del plan para la dirección del proyecto.
- c) Procesos de ejecución: el director del proyecto coordina todos los recursos para implementar el plan para la dirección del proyecto.
- d) Procesos de monitoreo y control: el director del proyecto y su equipo supervisan el avance del proyecto y aplican acciones correctivas.
- e) Procesos de cierre: se aceptan formalmente los entregables del proyecto.

## 2.3 Seguimiento y control de proyectos

A continuación se revisan las siguientes definiciones:

- De acuerdo con el Project Management Institute PMI [18]: Monitorear y controlar el trabajo del proyecto es el proceso de hacer seguimiento, revisar e informar el avance general a fin de cumplir con los objetivos de desempeño definidos en el plan para la dirección del proyecto.
- Según la Norma Internacional ISO 21500:2012 [20]: Control es la comparación del desempeño real del proyecto con el planificado, analizando las variaciones y tomando las acciones correctivas y preventivas apropiadas cuando sea necesario.

- Según Lledó [23]: Monitorear es recolectar datos, procesar información de desempeño y tendencias, para evaluar lo que está ocurriendo en el proyecto y generar alarmas en aquellas áreas que requieren mayor atención.
- Según Lledó [23]: Controlar es implementar acciones correctivas o preventivas cuando sea necesario y hacer un seguimiento de la implementación de esas acciones.
- Según Cruz Machado y Rosa [24]: El control es la función encargada de nivelar la toma de decisión empresarial, a lo largo del período de ejecución de la obra a través de la identificación de los desvíos ocurridos en relación a la planificación inicial.

La probabilidad de que un proyecto avance exactamente conforme su planificación, es muy baja, sobre todo cuando se tratan de proyectos complejos de construcción. El progreso del proyecto debe ser monitorizado y controlado para identificar y medir las desviaciones del avance real del trabajo comparado con lo planificado.

Incluso con un cronograma muy detallado de actividades y a cargo de un equipo de especialistas en la materia, el progreso real de la construcción del proyecto está bajo la influencia de varios factores internos y externos, que puede desviar significativamente la planificación inicial.

Realizar tareas para monitorizar y controlar el progreso de los proyectos, es indispensable para conocer y proyectar el avance del proyecto en términos de: conclusión de actividades, consumo de recursos, retrasos, entre otras cosas. Además esto nos permite implementar mejoras y correcciones a las estimaciones iniciales de la planificación.

El monitoreo del rendimiento del proyecto implica hacer mediciones a medida que avanza el proyecto y comparando estas mediciones con los valores deseados o esperados. Las pequeñas desviaciones entre el plan y el rendimiento real pueden considerarse dentro de los límites de la incertidumbre del proceso de construcción del modelo. Las diferencias más grandes pueden requerir de una acción de control para intentar llevar el rendimiento real al curso dentro del estado deseado del plan [25].

El ciclo de control de un proyecto involucra: la planeación, la medición, el monitoreo y las acciones correctivas, con sistemas de control que permiten medir la variación entre lo planeado y lo ejecutado [26].

A pesar de la alta concentración de estudios alrededor de la planeación y programación de proyectos, se identifican que las técnicas tradicionales de planeación y programación presentan dificultades para detectar desviaciones, demoras y retrasos, así como para identificar sus causas, a su vez, en el estudio realizado por San Cristóbal [25] indica que en una muestra de 130 proyectos, el 81,5% de estos terminaron fuera de los tiempos estimados originales, lo que demuestra la necesidad de técnicas y metodologías de control que permitan detectar y medir las desviaciones o discrepancias con respecto a la planeación original, así como las acciones necesarias para minimizarlas y cumplir con los objetivos del proyecto.

Los proyectos de ingeniería civil se identifican por tener características propias y singulares para cada uno de sus productos. Son construidos en el propio sitio donde serán utilizados; emplean intensamente recursos humanos, están expuestos a la intemperie y a las variaciones atmosféricas. Como ejemplo podemos citar una presa, la cual es diseñada exclusivamente para un sitio

específico, donde por su morfología, hidrología, geología, etc., no puede servir ese mismo diseño para otro sitio [24].

Los procesos de monitoreo y control deben ser no solo sobre el costo, el cronograma y el rendimiento de los recursos, sino también sobre la productividad y los factores de riesgo [27].

Algunas de las acciones que se realizan durante el monitoreo y control son [23]:

- Recolectar datos de desempeño del trabajo
- Procesar los datos en información de desempeño del trabajo
- Elaborar y distribuir informes de desempeño del trabajo
- Comparar el estado actual del proyecto vs sus líneas base
- Analizar variaciones en relación al plan original
- Evaluar alternativas para la mejora de procesos
- Estimar tendencias y proyecciones
- Analizar las solicitudes de cambio para aprobarlas, postergarlas o rechazarlas

Dentro de las herramientas que el PMI [18] recomienda utilizar para llevar el proceso de seguimiento y control de los proyectos están:

- Análisis de alternativas: evaluar diferentes opciones para la implementación de acciones correctivas o preventivas.
- Análisis costo-beneficio: seleccionar las mejores acciones correctivas o preventivas en función de la eficiencia (lograr el objetivo al menor costo posible) o justificación económica de implementar ese cambio.
- Análisis del valor ganado: evaluar de manera integral el desempeño del alcance-tiempo-costos.

- Análisis de la causa-raíz: investigar cuál es la principal causa de los problemas.
- Análisis de tendencias: en función de la información histórica y presente del proyecto, estimar tendencias y posibles resultados futuros.
- Análisis de la variación: evaluar las diferencias entre el estado actual del proyecto y las líneas base del plan original.

## 2.4 Proyectos de construcción complejos

Todo proyecto de construcción enfrenta un nivel de complejidad propio e intrínseco durante su ejecución. Esta complejidad está vinculada a una incertidumbre que ejercen los diferentes factores y actores que conforman el sistema del proyecto.

Para un director de proyecto, entender la complejidad del proyecto desde las etapas tempranas de construcción, tiene una importancia significativa debido a que la complejidad está estrechamente relacionada con la toma de decisiones y el logro de objetivos planificados.

Como lo establece San Cristóbal [28], la relación entre la complejidad y los procesos de gestión del proyecto, tiene gran importancia por las razones siguientes:

- Ayuda a determinar los requisitos de planificación, coordinación y control
- Dificulta la identificación clara de las metas y objetivos de los proyectos principales
- Puede afectar la selección de un formulario de organización de proyecto apropiado y los requisitos de experiencia del personal de gestión

- Puede usarse como un criterio en la selección de un acuerdo de gestión de proyecto adecuado
- Puede afectar diferentes resultados del proyecto (tiempo, costo, calidad, seguridad, etc.).

## 2.4.1 Definiciones

### Complejidad

En la búsqueda de una definición para la complejidad en el contexto de proyectos, se han encontrado una gran diversidad de definiciones, que invita a deducir que aún no existe un consenso.

La complejidad es un término de referencia para estructuras intrincadas y connota un alto grado de complicación, dificultad y enredo. Algo complicado es intrincado y difícil de entender; pero un problema complicado todavía tiene al menos una solución.

Algo complejo implica una verdadera incertidumbre e imprevisibilidad; un problema complejo no tiene una solución única y tal vez ni siquiera una mejor solución.

Según Brockmann y Kähkönen [29] “la complejidad es igual al número de elementos, sus interacciones y la fuerza de los impactos de un sistema definido con respecto a la toma de decisiones”.

San Cristóbal [28], realizó una compilación de definiciones de “complejidad” de varios autores que se presentan a continuación:

- La complejidad es la suma de los siguientes componentes: la diferenciación de funciones en un proyecto entre clientes, contratistas, subcontratistas, proveedores, bancos, etc. o la diferenciación interna de la organización del contratista (grado de multiplicidad); Las dependencias entre los súper sistemas, los sistemas y los diferentes subsistemas o entre los últimos (interrelación); y el impacto o procesos consecuentes de un campo de decisión.
- La complejidad consiste en interdependencias entre las tecnologías de productos y procesos, la novedad y la dificultad de los objetivos.
- La complejidad se puede ver como una propiedad del sistema que hace que sea difícil de entender.
- La complejidad es la incongruencia de la información cuando interactúan demasiadas variables.

En el estudio realizado por Ameen y Jacob [21], se presentó la siguiente definición:

- Un sistema complejo es algo compuesto por un gran número de partes que interactúan de una manera no simple y el todo es más que la suma de sus partes en un sentido pragmático.

Otra definición propuesta por Kermanshachi, Dao, Shane y Anderson [3] indica:

- Un sistema complejo es un todo que consiste en varios elementos que interactúan entre sí de muchas maneras diferentes.

### Proyecto complejo

No existe una definición estándar de complejidad que pueda aplicarse de manera general a todos los proyectos. No existe una regla estándar o un método único

de identificar, representar o comprender la complejidad de los proyectos, y peor aún de cómo medir y gestionar el impacto de la complejidad en los proyectos [30].

La Asociación Internacional de Gestión de Proyectos – International Project Management Association IPMA [31], define a un proyecto complejo como aquel proyecto que cumple con los siguientes criterios:

- Muchos subsistemas / sub-proyectos y elementos interrelacionados deberían tenerse en cuenta dentro de las estructuras de un proyecto complejo y en relación con su contexto en la organización.
- Varias organizaciones están involucradas en el proyecto y / o diferentes unidades en la misma organización pueden beneficiarse o proporcionar recursos para un proyecto complejo.
- Varias y diferentes disciplinas trabajan en un proyecto complejo.
- La gestión de un proyecto complejo implica varias fases diferentes, a veces superpuestas.
- Muchos de los métodos, técnicas y herramientas disponibles y que se necesitan en la gestión de proyectos, se aplican en la gestión de un proyecto complejo. En la práctica, esto significaría que se aplicaría más del sesenta por ciento de los elementos de competencia.

Otra definición propuesta por Kermanshachi, Dao, Shane y Anderson [30] indica:

“La complejidad del proyecto es el grado de interrelación entre los atributos del proyecto y las interfaces, y su impacto consecuente sobre la predictibilidad y la funcionalidad”.

## 2.4.2 La complejidad en proyectos

Los proyectos complejos exigen un nivel excepcional de gestión, incluso la aplicación de sistemas desarrollados para proyectos ordinarios es inadecuada

para proyectos complejos. La investigación en la industria de la construcción ha demostrado que la complejidad sí afecta a los proyectos como un factor que dificulta la identificación de metas y objetivos, e influye en el plazo, costo y calidad de un proyecto. La complejidad de un proyecto es una característica que impacta en las prácticas de desarrollo y gestión del proyecto [30].

La complejidad debe ser atendida y estudiada de manera singular, antes y durante la ejecución de un proyecto. La atención a la complejidad debe permitir al equipo del proyecto identificar y definir la influencia de la complejidad durante el análisis y la toma de decisiones respecto a: costos, cronograma, calidad, y desempeño.

El estudio realizado por Widforss y Rosqvist [32], aplica encuestas a 37 gerentes de Oficinas de Dirección de Proyectos (PMO) de empresas públicas y privadas en Suecia, entre los sectores más destacados: banca, construcción, y automotriz. Se abordaron criterios de complejidad en la dirección de proyectos y cómo enfrentar estos problemas. Los autores del estudio concluyen que si bien la complejidad de un proyecto puede abordarse a través de una sólida estructura organizacional, y a través de un sistema robusto de control y monitoreo, también es importante centrarse en la comunicación con los interesados del proyecto (stakeholders), lo dicho se sustenta en que la estructura, las herramientas y las plantillas utilizadas para la gestión del proyecto, son menos útiles para proyectos complejos, resulta más importante el liderazgo, el soporte administrativo que tenga el proyecto, la experiencia y las habilidades del talento humano a cargo del proyecto.

El estudio realizado por Ammen y Jacob [21], analizó la complejidad de los proyectos en base a una encuesta realizada a profesionales en la dirección de

proyectos, además se complementó la investigación con un análisis teórico y métodos cuantitativos aplicados. Los resultados de este estudio se exponen a continuación:

- Los autores consideran que resulta demasiado simplista clasificar los proyectos como complejos o no complejos, sería más importante identificar la fuente de la complejidad, el nivel y también las implicaciones de la complejidad en la ejecución del proyecto.
- La cantidad de componentes de un proyecto y su interdependencia resultan un factor clave que influye en la complejidad.
- El tamaño y dificultades de ejecución del proyecto influyen significativamente en los niveles de complejidad. Lo dicho se sustenta en que el 50% de los encuestados estuvieron de acuerdo y alrededor del 30% estuvieron muy de acuerdo.
- La complejidad de un proyecto está muy ligada a la gestión de los interesados internos y externos (stakeholders). Los profesionales sienten que comunicarse de manera clara con los clientes internos y externos es de primordial importancia.
- Según los encuestados, los desafíos técnicos son vistos como una tarea manejable por el equipo técnico, por tanto no figuran como un principal factor que causan complejidad.

El estudio realizado por Kermanshachi, Dao, Shane y Anderson [30] identificó los indicadores de complejidad de proyectos y proporcionó estrategias para gestionar proyectos complejos. La investigación se basó en un estudio realizado

por el Instituto de la Industria de la Construcción CII<sup>1</sup> donde se trabajaron con estadísticas de 101 variables pertenecientes a 11 categorías que podrían afectar el nivel de complejidad de los proyectos. Los autores aplicaron la técnica Delphi a 10 especialistas en gestión de proyectos como propietarios, consultores y empresas contratistas. Cada uno con muchos años de experiencia en la gestión de proyectos nacionales e internacionales, en conjunto, los profesionales sumaban más de 200 años de experiencia.

El resultado de los indicadores de complejidad identificados en el estudio se presentan en la Tabla 2-1.

Tabla 2-1: Indicadores de complejidad y sus categorías según Kermanshachi, Dao, Shane, Anderson

---

Categoría	Indicador de Complejidad (CI)
Interfaces	Número máximo de participantes a tiempo completo en el Equipo de Dirección del Proyecto durante la fase de diseño / ingeniería detallada del proyecto.
Alcance	Definición Impacto de la magnitud de las órdenes de cambio en la ejecución del proyecto.
Recursos del proyecto	Frecuencia de soluciones porque los materiales no estaban disponibles cuando era necesario para apoyar la construcción.
Diseñar tecnología	El grado de familiaridad de la compañía con las tecnologías que participarán en la fase de proyecto de ingeniería / diseño detallado.

---

<sup>1</sup> Instituto de la Industria de la Construcción (CII), con sede en la Universidad de Texas en Austin, es un consorcio sin fines de lucro de más de 100 empresas propietarias tanto públicas como privadas, contratistas de ingeniería y proveedores.

Definición del alcance	Impacto del tiempo de las órdenes de cambio en la ejecución del proyecto.
Ubicación	Impacto de la ubicación del proyecto en el plan de ejecución del proyecto.
Gobernancia	Número de entidades de supervisión ejecutiva superiores al Equipo de Dirección del Proyecto que tendrán autoridad para tomar decisiones sobre el plan de ejecución del proyecto.
Gobernancia	Número total de socios de empresas conjuntas en este proyecto.
Recursos del proyecto	Cuestiones de calidad de mano de obra calificada durante la construcción del proyecto.
Gestión de los interesados	Impacto de las aprobaciones requeridas de partes interesadas externas en el plan de ejecución original del proyecto.

---

Fuente: adaptado por el autor de [30]

El estudio realizado por Dao, Kermanshachi, Shane, Anderson, Hare [33] presenta el desarrollo de atributos de complejidad e indicadores para la medición de esos atributos. Los datos utilizados en el estudio se sustentan en una encuesta a 140 miembros de la compañía CII. El objetivo de la encuesta fue evaluar los diferentes indicadores de complejidad basados en respuestas entre proyectos de baja complejidad y proyectos de alta complejidad, donde las diferencias debía ser estadísticamente significativas para argumentar que el indicador era un verdadero reflejo de la complejidad del proyecto.

El resultado del estudio arrojó que 37 indicadores de complejidad pertenecientes a 23 atributos de complejidad fueron estadísticamente significativos para diferenciar entre proyectos de baja complejidad y proyectos de alta complejidad.

De estos 37 indicadores, en la Tabla 2-2 se presentan los más importantes desde el punto de vista de esta tesis [34]:

Tabla 2-2: Indicadores de complejidad y sus categorías según Dao, Kermanshachi, Shane, Anderson, Hare

Categoría	Indicador de complejidad
Gestión de los interesados	CI-2_ Impacto de las aprobaciones requeridas de partes interesadas externas en el plan de ejecución original del proyecto.
	CI-3_ Impacto de la inspección requerida por agencias / entidades externas (reguladoras) en el plan original de ejecución del proyecto.
Objetivo de ejecución	CI-17_ Compare el financiamiento del proyecto objetivo contra la industria / puntos de referencia internos.
	CI-18_ Compare el cronograma del proyecto objetivo con la industria / parámetros internos.
Planificación fiscal	CI-7_ Número de fases de financiación (puertas) desde el concepto hasta la finalización del proyecto.
	CI-8_ Las demoras o dificultades específicas para asegurar el financiamiento del proyecto.
Definición del alcance	CI-30_ Impacto de la magnitud de las órdenes de cambio en la ejecución del proyecto.
	CI-31_ Impacto del tiempo de las órdenes de cambio en la ejecución del proyecto.
	CI-34_ Cuestiones de calidad de mano de obra calificada durante la construcción del proyecto.
Recursos del proyecto	CI-35_ Frecuencia de soluciones (actividades de trabajo fuera de secuencia para continuar) porque los materiales no están disponibles cuando es necesario para apoyar la construcción.
	CI-36_ Porcentaje de rotación de mano de obra artesanal.

CI-37\_Porcentaje de mano de obra artesanal de origen local (dentro de un radio de 100 millas del lugar de trabajo).

CI-23\_Número de ubicaciones de ejecución que se utilizarán en este proyecto durante la fase de ingeniería / diseño detallado.

Ubicación CI-24\_Número de ubicaciones de ejecución que se utilizarán en este proyecto durante la fase de fabricación (materiales a granel y equipo).

CI-27\_Impacto de la ubicación del proyecto en el plan de ejecución del proyecto.

---

Fuente: adaptado por el autor de [33] [34]

El estudio realizado por Brockmann y Kähkönen [29] propuso una metodología para evaluar la complejidad de proyectos. Se basa en una matriz con cinco dimensiones: complejidad de la tarea, complejidad social, complejidad cultural, complejidad cognitiva, y complejidad operacional. A cada una de estas dimensiones le corresponden factores de elementos, interacciones e impactos. El estudio propone que este análisis y cuantificación la debe realizar un grupo de expertos.

## 2.5 Revisión de metodologías de seguimiento y control de proyectos

El esfuerzo de ejecutar tareas de seguimiento y control de un proyecto está enfocado en saber que todo el trabajo, tanto el realizado como el que se está realizando, efectivamente concuerda con la planificación; y, tener las proyecciones y métricas sustentadas que permitan anticiparse a posibles desviaciones que podrían afectar a la planificación del proyecto; estas

desviaciones pueden ser positivas (oportunidades de mejora) o negativas (problemas que podría sufrir el proyecto).

El control de proyectos tiene como objetivo monitorizar el desempeño, con la intención de reducir las desviaciones contrastadas con la planificación [35].

Un proyecto que cuente con una planificación adecuada en términos de: presupuesto, suministros, financiamiento, contratos, facilita la tarea del control de la ejecución del proyecto [36].

En el seguimiento y control de un proyecto, se tienen como variables mínimas a ser conocidas, monitoreadas y controladas:

- Avance físico
- Avance financiero
- Proyecciones de costo y tiempo

Durante la ejecución del proyecto y haciendo una retrospectiva periódica, se gestiona el control del tiempo, realizando comparativas entre el tiempo planificado de cada actividad versus el tiempo realmente empleado en su ejecución. Este análisis es fundamental en la toma de decisiones que permitan correctivos.

En lo que respecta a los costos, llevar un control permite mantener los gastos del proyecto dentro de los costos autorizados o planificados [37].

Dentro de las técnicas o metodologías más usadas para ejecutar el seguimiento y control de un proyecto, están: Cronograma Valorado, Metodología Gobierno Por Resultados GPR, Sistema Last Planner, Valor Ganado, Cronograma Ganado, y Opinión de Expertos.

A continuación se describen estas técnicas o metodologías:

### 2.5.1 Cronograma Valorado

En muchas instituciones del Estado Ecuatoriano que gestionan y administran proyectos de obras civiles ordinarias, es muy usual que se mida el avance de estos proyectos a través de la técnica del Cronograma Valorado, que consiste en la comparativa de los costos planificados versus los costos realmente ejecutados.

Dentro de la legislación de ecuatoriana de contratación pública, el cronograma valorado es un documento contractual, el mismo que permite a partir del presupuesto, establecer un flujo de rubro a rubro, y periodo a periodo, de cómo se van a ir ejecutando, dentro del plazo establecido [38].

La ecuación utilizada es la siguiente:

$$\% \text{ Avance Real}_i = \frac{\text{Costo Real}_i}{\text{Costo total planificado}} \times 100$$

Donde:

i: periodo de evaluación

% Avance Real: Avance del desempeño del proyecto medido en porcentaje

Costo Real: Costo realmente ejecutado en cada periodo

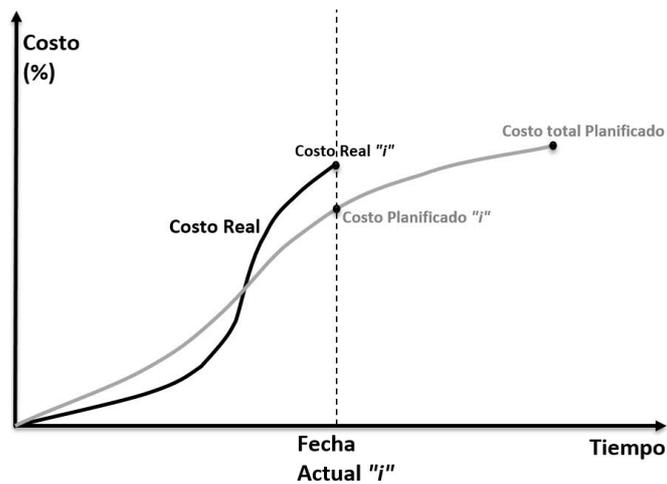
Costo total planificado: Valor total del presupuesto del proyecto

Por otra parte la línea base de comparación se calcula con la sumatoria de los costos en cada periodo de tiempo, por tanto se consigue un cronograma valorado,

que al final se presenta en porcentaje para cada periodo de tiempo respecto al costo total del presupuesto. En la Figura 2-1 se presenta el detalle de lo expuesto.

El cronograma valorado corresponde a un desglose de todos los rubros que forma parte del proyecto, en el Ecuador se formaliza a través de un contrato de construcción entre la entidad contratante y el constructor.

Figura 2-1: Curva S de Costo-Tiempo que utiliza como base el método del Cronograma Valorado



En la

Tabla 2-3 se presenta un ejemplo de la aplicación de esta metodología, donde se plantea un cronograma valorado para 5 rubros a ser ejecutados en 6 periodos de tiempo (en el Ecuador por lo general los periodos de tiempo son en meses).

Tabla 2-3: Ejemplo de cronograma valorado

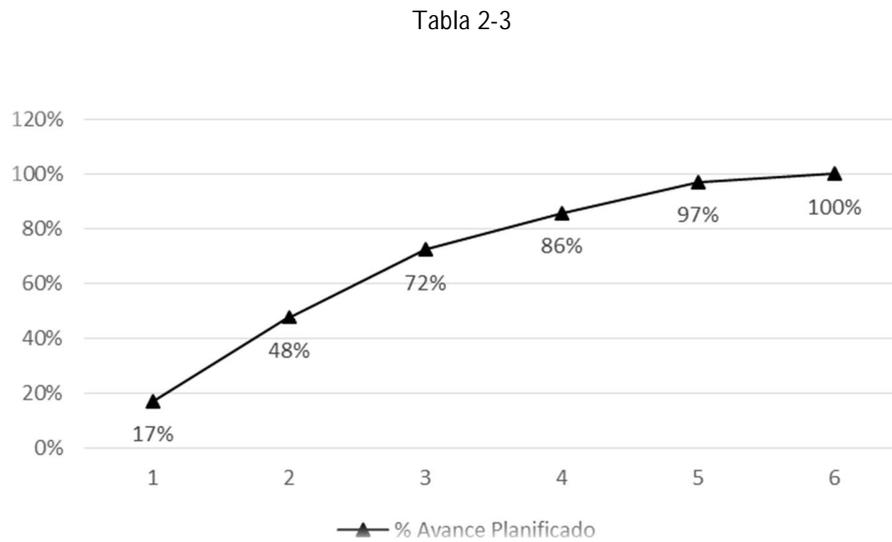
Rubros	Periodos de tiempo					
	1	2	3	4	5	6
A	50					
B	40	40	40			
C		60				
D		60	70	50	30	
E			20	20	30	15
C. Totales [USD]	90	160	130	70	60	15
C. Planificados [USD]	90	250	380	450	510	525
% Avance Planificado	17%	48%	72%	86%	97%	100%

Fuente: propia del autor

Continuando con el ejemplo planteado en la

Tabla 2-3, se genera un gráfico donde se presenta el porcentaje de avance planificado (línea base) en el tiempo, esta grafica se presenta en la Figura 2-2.

Figura 2-2: Avance planificado según ejemplo de la



Fuente: propia del autor

Continuando con el ejemplo, en la Tabla 2-4 se presenta el avance del proyecto hasta el periodo 5, presentado en montos económicos realmente ejecutados para cada rubro.

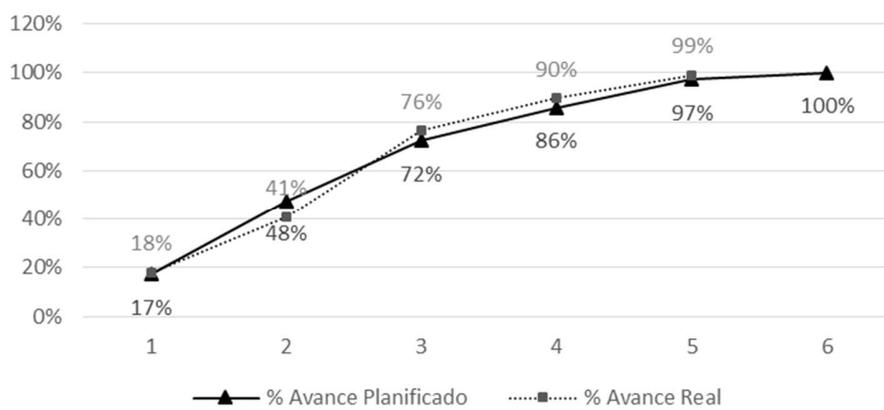
Tabla 2-4: Ejemplo de costos realmente ejecutados

Rubros	Periodos de tiempo					
	1	2	3	4	5	6
A	60					
B	35	45	60	10		
C		40	40			
D		35	50	35	20	
E			35	25	30	
Totales Reales [USD]	95	120	185	70	50	
C.R. Ejecutados [USD]	95	215	400	470	520	
% Avance Real	18%	41%	76%	90%	99%	

Fuente: propia del autor

Para el control del avance del proyecto se procede a graficar la línea base o costos planificados versus los costos realmente ejecutados en porcentaje, como se muestra en la gráfica de la Figura 2-3.

Figura 2-3: Ejemplo de avance planificado vs. Costos ejecutados presentados en %



Fuente: propia del autor

Cuando un proyecto se ejecuta exactamente en cantidades y costos de acuerdo a lo planificado, la métrica de esta metodología sería correcta, sin embargo se deja planteada la interrogante sobre si los proyectos de construcción en su mayoría, efectivamente se ejecutan sin cambios en cantidades y costos, y aún más cuando los proyectos son de gran envergadura con una cantidades significativa de rubros y con tiempos estimados significativos.

## 2.5.2 Metodología Gobierno por Resultados (GPR)

“Gobierno Por Resultados es una solución integral de metodologías, herramientas digitales, aprendizaje práctico y adopción de cambio para soluciones sostenibles y autosuficiencia del cliente” [39].

Gobierno Por Resultados (GPR) da soporte a la gestión que realiza el Gobierno Nacional del Ecuador, en su planificación, seguimiento y actualización de los planes estratégicos y operativos en todos los niveles institucionales del país. GPR se presenta como una solución robusta para implementar las mejores prácticas en la administración de proyectos.

### a. Medición del desempeño con GPR

En lo que respecta a la medición del desempeño, el GPR lo define como los “signos vitales” de una institución y comunican lo importante a la institución. Se debe medir para: mejorar, planear y predecir, competir, incentivar y recompensar, cumplir con leyes, regulaciones y estándares.

### b. Administración del costo del proyecto

GPR estima un indicador de administración del costo del proyecto realizando una comparativa periódica entre el presupuesto programado versus el presupuesto ejecutado, y le acopla una banda de tolerancia de +/- 15%.

GPR propone una semaforización para las alertas en caso de que existan desviaciones, como se muestra en la Figura 2-4.

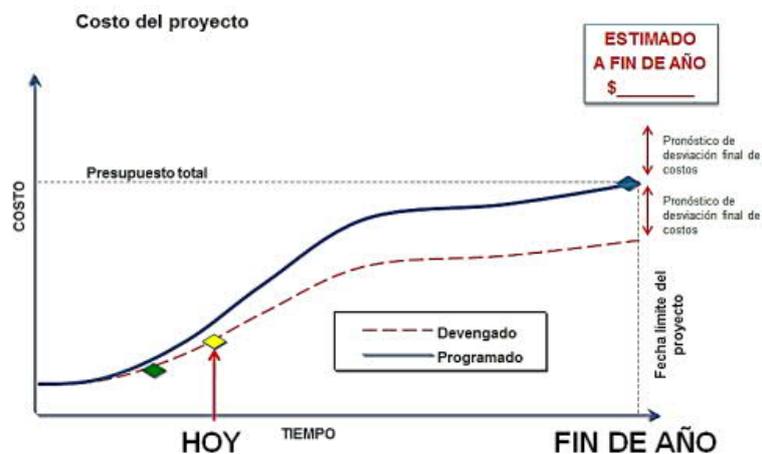
Figura 2-4: Semaforización de alertas en presupuestos según GPR

Tipo de semáforo	Descripción	Semáforo
Presupuesto Devengado	Presupuesto devengado acumulado vs. programado acumulado $\leq 10\%$ (+/-)	
	Presupuesto devengado acumulado vs. programado acumulado $< 15\%$ (+/-)	
	Presupuesto devengado acumulado vs. programado acumulado $\geq 15\%$ (+/-)	

Fuente: [39]

GPR recomienda la actualización mensual del campo “estimado a fin de año” de la Figura 2-5, por parte del líder de proyecto, y además recomienda realizar una revisión periódica por parte del patrocinador ejecutivo y el equipo institucional, con el afán de tomar las acciones de prevención o correctoras.

Figura 2-5: Gráfica de proyección de costos según GPR



Fuente: [39]

c. Administración del avance físico

Para el cálculo del avance físico del proyecto, GPR se basa en un análisis de hitos de cumplimiento. Los hitos son definidos por GPR como un evento significativo dentro del cronograma del proyecto y que representa un logro en el avance del proyecto. Los hitos deben ser asociados a entregables o condiciones tangibles verificables [39].

La metodología GPR recomienda que se establezcan hitos con una periodicidad apropiada, de preferencia mayor a la mensual, se otorgará a cada hito un peso relativo de acuerdo a la importancia, fase y esfuerzo para lograrlo. Al final la suma de todos los pesos asignados deberá ser el 100%.

En la programación de hitos, se deberá establecer el número necesario para toda la vida del proyecto. En caso de proyectos con duraciones multianuales GPR recomienda desglosar en detalle los hitos del año en curso y dejar hitos principales para los años posteriores.

GPR recomienda identificar hitos que tengan oportunidad política, como inauguraciones, puesta de la primera piedra, etc.

En el sistema de GPR se registra el cronograma de hitos con su respectivo avance en porcentaje, cuando un hito se cumple, el peso asignado a ese hito se acumula al total del avance físico del proyecto.

El control del avance físico, GPR lo realiza a través de una comparativa entre el avance físico real versus el avance físico planificado, posteriormente generando alertas conforme se muestra en la Figura 2-6.

Figura 2-6: Alertas en avance físico según GPR

Tipo de semáforo	Descripción	Semáforo
Hitos	Hito cumplido a tiempo o hito abierto antes de la fecha comprometida	
	Hito en riesgo, no se ha cumplido y pasó la fecha comprometida o la fecha estimada es posterior a la fecha comprometida	
	Hito cumplido después de la fecha comprometida	
Avance físico	> 100% avance físico real acumulado vs. programado acumulado	
	Entre 85% y 100% avance físico real acumulado vs. programado acumulado	
	≤85% avance físico real acumulado vs. programado acumulado	

Fuente: [39]

### 2.5.3 Sistema Last Planner

#### a. Historia

Last Planner System (Sistema del Último Planificador) aparece por primera vez en un documento presentado formalmente en el año 1994 por Herman Glenn Ballard, posteriormente, el mismo Ballard en el año 2000 presenta su tesis doctoral "The Last Planner System of Production Control", donde evoluciona y mejora las herramientas tradicionales de programación en cascada [40].

Last Planner System se basa en la filosofía Lean Construction, que consiste en adaptar la filosofía Lean a la construcción.

#### b. Metodología

Last Planner System es un sistema que planifica un flujo de trabajo, y que a través de un control de la producción busca la confiabilidad y reducir la incertidumbre y variabilidad. Last Planner planifica lo que se quiere hacer, programa las

actividades y controla la producción a través de las consideraciones siguientes: Medir y monitorear el cumplimiento de asignaciones, Identificar y eliminar las causas de no cumplimiento, mantener buffers razonables para cada equipo libre de restricciones y se debe tener requisitos previos a una actividad cuando el sistema lo requiera [41].

El Sistema Last Planner involucra planificación intermedia y semanal alineada a una planificación maestra o total del proyecto, a su vez, Last Planner mide el desempeño semanal de la planificación [42].

Niveles de planificación con Last Planner

- Planificación maestra.- Se refiere a la planificación global o total del proyecto, denominada cronograma maestro. Se establecen las metas y objetivos finales del proyecto. El cronograma maestro contiene los hitos, que son acontecimientos especiales o importantes dentro del proyecto.
- Planificación Intermedia.- o Lookahead Planning, se refiere a la planificación que permita tener una idea inicial de las actividades que serán ejecutadas, generalmente en los siguientes 4 a 6 semanas. En esta planificación se definen y coordinan las restricciones que puedan darse dentro de las actividades a ejecutarse.
- Planificación Semanal.- Se refiere a la planificación de detalle. En esta etapa de la planificación se trabaja en el control de las unidades de producción. En esta etapa se escogen las actividades a desarrollar la siguiente semana [41] [43].

El sistema Last Planner se basa en el cálculo de dos indicadores principales: Porcentaje de Plan Completado (PPC) y Porcentaje de Cumplimiento de Restricciones (PCR), a continuación el detalle de cada uno [44].

Porcentaje de Plan Completado (PPC).- De acuerdo a este sistema, el PPC muestra el avance físico del proyecto medido en cada periodo corto de plazo, por lo general cada semana. Se calcula con la siguiente formula:

$$PPC (\%) = \frac{\text{Hitos completados}}{\text{Hitos totales}} \times 100$$

Para cada hito se le asigna un número binario:

0.- El hito no fue completado totalmente

1.- El hito fue completado en su totalidad

Porcentaje de Cumplimiento de Restricciones (PCR).- De acuerdo a Last Planner, el PCR refleja la eficiencia en tender restricciones del proyecto. La fórmula de cálculo es la siguiente:

$$PCR (\%) = \frac{A + B}{C} \times 100$$

Donde:

A.- Número de restricciones liberadas dentro del plazo corto actual de análisis.

B.- Número de restricciones liberadas dentro del plazo corto actual de análisis, sin embargo su compromiso de liberación fue el periodo de plazo corto anterior.

C.- Número total de restricciones hasta el periodo de plazo corto actual.

#### 2.5.4 Técnica del Valor Ganado EVM

##### a. Historia del Valor Ganado

En los años 60, la Fuerza Aérea de los Estados Unidos, fueron los pioneros en dar el enfoque del valor ganado. Durante los años 50 y 60 el Departamento de Defensa (DoD) de los Estados Unidos, evidenció que mientras los proyectos son más grandes y complejos, resulta mucho más complejo llevar un seguimiento, y esto es porque en los proyectos de gran envergadura, existen múltiples involucrados, como contratistas, subcontratistas, etc., y cada uno con sus propios métodos y sistemas de planificación y control.

A partir de 1967 el Departamento de Defensa (DoD) adoptó para cada proyecto grande, un sistema de control integrado de plazos y costos, con la intención que el DoD pudiera monitorizar el avance. Este sistema se lo denominó C/SCSC (Cost / Schedule Control System Criterial) y al documento asociado a este sistema se lo llamó DODI 7000.2. Los criterios del DODI 7000.2 fueron 35 e incorporaron dentro de ellos el concepto del Valor Ganado.

El Departamento de Defensa Estadounidense (DoD) utilizó este sistema durante casi treinta años, hasta 1996, generando una gran base histórica de resultados.

En 1998 la Asociación Nacional del Defensa Industrial (NDIA) consiguió que es sistema fuese aceptado por el American National Estándar Institute/electronic

Industry Association (ANSI/EIA) con el nombre de ANSI/EIA- 748-1998, luego adoptado en 1999 por el Departamento de Defensa Estadounidense (DoD) como estándar para todos sus proyectos.

En el año 2005 y hasta la fecha, el método del Valor Ganado (EVM) es adoptado por el Project Management Institute (PMI), que es una asociación sin fines de lucro creada en el año 1965 con sede en Pennsylvania, Estados Unidos, la cual está conformada con el mayor número de profesionales de la gestión de proyectos en el mundo [45].

Como se ha indicado, EVM encuentra aplicación en contextos muy variados. Se trata de una técnica tradicionalmente aplicada en la industria de la construcción [46] [47] [48], donde se aplica de manera habitual y exitosa, pero que también ha resultado de utilidad en contextos muy especializados y más alejados del proyecto constructivo tradicional, como se ha indicado, pueden ser proyectos desarrollados por la NASA en el marco de la ingeniería aeroespacial [49] o la construcción de plantas nucleares [50]. Estos ejemplos dan muestra de la capacidad de adaptación de la técnica a distintos escenarios. En ese sentido existen interesantes estudios en los que el EVM se aplica al análisis y mejora de procesos productivos [51] [52] [53] [54].

#### b. La Técnica

La técnica del Valor Ganado se encuentra recomendada en [18] dentro de los procesos de control del desempeño en cronograma y costos de un proyecto.

La técnica del Valor Ganado realiza una comparación del desempeño de línea Base o desempeño planificado con respecto al desempeño real, tanto en



planificación de costos como la línea base que servirá para las comparativas futuras del desempeño.

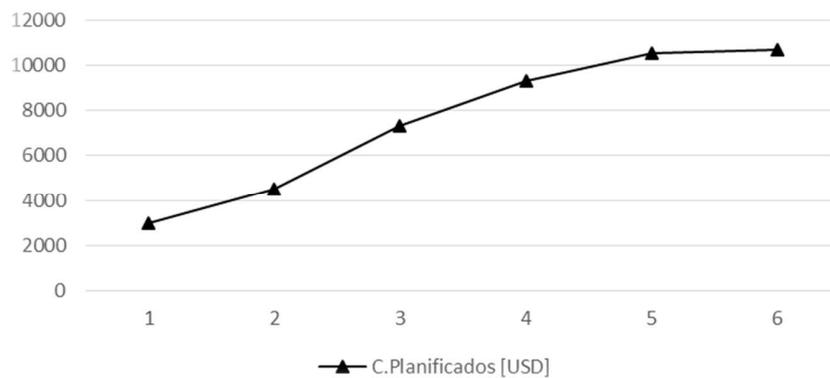
En la Tabla 2-5 se presenta un ejemplo del valor planificado, donde se distribuyen 5 tareas en 6 periodos de tiempo, con su respectivo costo.

Tabla 2-5: Ejemplo de planificación de costos de 5 tareas en 6 periodos de tiempo

Tareas	Periodos de tiempo					
	1	2	3	4	5	6
A	1000	800	800			
B		500	800	800		
C	2000					
D			1000	1000	1000	
E		200	200	200	200	200
C. Totales [USD]	3000	1500	2800	2000	1200	200
C. Planificados [USD]	3000	4500	7300	9300	10500	10700

Si los costos planificados expuestos en el ejemplo de la Tabla 2-5 son llevados a una gráfica en el tiempo, se tiene el resultado expuesto en la Figura 2-8.

Figura 2-8: Ejemplo de planificación de costos –línea base (PV)



**Costo Real Ejecutado (AC).**- Se refiere a la sumatoria de los costos realmente ejecutados en cada tarea y en cada periodo de tiempo.

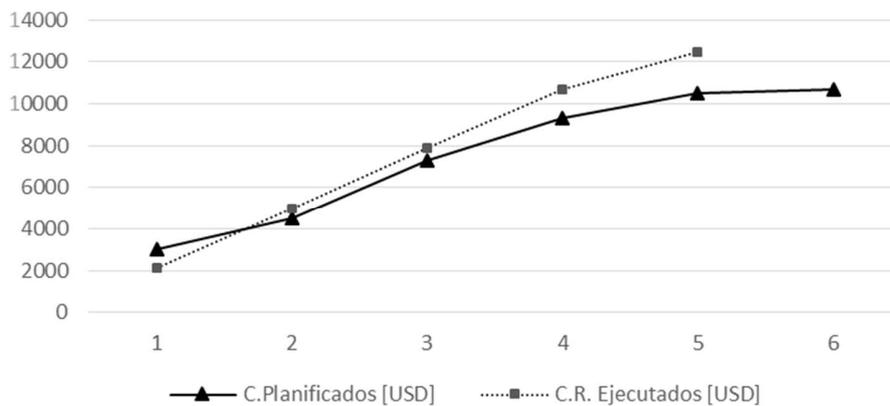
En la Tabla 2-6 se presenta el Costo Real Ejecutado para el mismo ejemplo, donde se evalúa hasta el periodo 5 de tiempo.

Tabla 2-6: Ejemplo de planificación de costos de 5 tareas en 6 periodos

Tareas	Periodos de tiempo					
	1	2	3	4	5	6
A	1100	1200	800			
B		1200	800	1000		
C	1000					
D			800	1500	1500	
E		500	500	300	250	
Totales Reales [USD]	2100	2900	2900	2800	1750	
C.R. Ejecutados [USD]	2100	5000	7900	10700	12450	

Al graficar los Costos Realmente Ejecutados (AC) del ejemplo de la Tabla 2-6 con el Valor Planificado (PV) de la Tabla 2-5, obtenemos la Figura 2-9.

Figura 2-9: Ejemplo de Costos Planificados (PV) y Costos Realmente Ejecutados (AC)



Valor Ganado (EV).- Se refiere al trabajo realmente ejecutado expresado en costo. Esta métrica se calcula al multiplicar el porcentaje del avance físico real de cada actividad por el costo planificado.



Para el análisis de los costos, el método del Valor Ganado calcula:

- Variación de los costos (CV: Cost Variance)
- Índice de desempeño de los costos (CPI: Cost Performance Index)

Variación de los costos.- esta métrica se calcula  $CV=EV-AC$ , y si CV es positivo representa eficiencia, es decir se está gastando menos de lo planificado; si CV es negativo representa ineficiencia, es decir se está gastando más de lo planificado.

Índice de desempeño de los costos.- Esta métrica se calcula  $CPI=EV/AC$ ; y se interpreta: Si CPI es menor a 1 representa ineficiencia, ya que se gasta más de lo que se trabaja; si CPI es mayor que 1 representa eficiencia.

#### Desempeño en función del cronograma

Para el análisis del cronograma, el método del Valor Ganado determina:

- Variación del cronograma (SV: Schedule Variance)
- Índice de desempeño del cronograma (SPI: Schedule Performance Index)

Variación del cronograma.- esta métrica se calcula  $SV=EV-PV$ , y si SV es positivo representa eficiencia, es decir se está ejecutando el proyecto más rápido de lo planificado; si SV es negativo representa ineficiencia, es decir se está ejecutando el proyecto más lento que lo planificado.

Índice de desempeño del cronograma.- Esta métrica se calcula  $SPI=EV/PV$ ; y se interpreta: Si SPI es menor a 1 representa ineficiencia, ya que muestra retraso; si SPI es mayor que 1 representa eficiencia.

#### Predictores del desempeño

La técnica del Valor Ganado, también analiza las tendencias del desempeño del proyecto en términos de costo y cronograma, es decir, en base a los resultados históricos del desempeño calculados en cada periodo (CV, CPI, SV, SPI), realiza proyecciones a futuro para compararlos con el presupuesto y cronograma inicial.

Predictores de costo.- Para predecir las posibles tendencias de los costos a futuro durante la ejecución del proyecto, la técnica del Valor Ganado determina:

- Presupuesto hasta la conclusión (BAC: Budget at completion).- Es el presupuesto total estimado en la planificación del proyecto.
- Estimación a la conclusión (EAC: Estimate at completion).- Es la proyección o estimación de cuánto podría costar el proyecto al finalizar. Esta estimación se realiza en base a los resultados históricos que va teniendo el proyecto durante su ejecución.
- Estimación hasta la conclusión (ETC: Estimate to complete).- Es la proyección de cuanto más podría costar el proyecto.

Las fórmulas de cálculo son las siguientes:

- $EAC = AC + (BAC-EV)$   
 $= BAC / CPI$   
 $= AC + [(BAC-EV) / (CPI \times SPI)]$
- $ETC = EAC - AC$

Regresando al ejemplo planteado, en la Tabla 2-8 se muestran el cálculo del desempeño de los costos, cronograma y predictores.

Tabla 2-8: Cálculo de desempeño del costo, cronograma y predictores en el ejemplo

		Periodo de tiempo				
		1	2	3	4	5
Desempeño de Costos	CV	40	520	-330	-1000	-1300
	CPI	1.01	1.12	0.95	0.89	0.88
Desempeño del Cronograma	SV	940	20	-930	-2400	-3250
	SPI	1.45	1.00	0.88	0.78	0.74
	BAC	10700	10700	10700	10700	10700
Predictores	EAC	10559.21	9591.63	11206.60	11989.16	12211.96
	ETC	8459.21	4591.63	3306.60	1289.16	-238.04

Interpretando la Tabla 2-8, para el periodo 5 de ejecución del proyecto del ejemplo, se tiene lo siguiente:

- El valor de CV = -1300 se interpreta que se está gastando \$1300 más de lo planificado.
- El valor del índice CPI = 0.88 se interpreta que el proyecto obtiene \$0.88 por cada \$1 invertido.
- El valor de SV= -3250 se interpreta que al ser negativo el proyecto está retrasado en cronograma.
- El valor de SPI= 0.74 se interpreta que el proyecto ha avanzado el 74% de lo planificado de acuerdo al cronograma.
- El valor de EAC = 12211.96 se interpreta que el proyecto tendrá un costo estimado al finalizar de \$12211.96

- El valor de ETC = -238.04 se interpreta que faltaría gastar \$238.04 para concluir el proyecto.

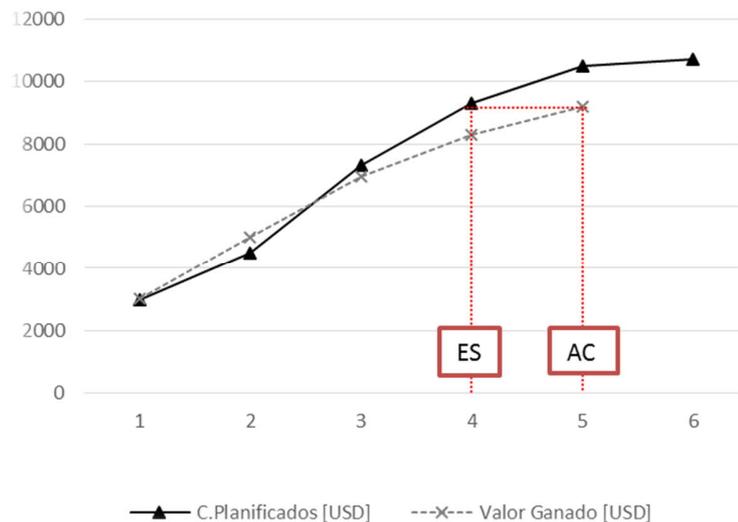
### 2.5.5 Cronograma Ganado

El método del "Cronograma Ganado" o "Earned Schedule" (ES), se basa en el método del Valor Ganado y puede considerarse una extensión de EVM. Introduce un cambio profundo en las métricas del análisis de la gestión del tiempo, es decir, propone cambios para los indicadores: Variación del Cronograma (SV) y el Índice de Desempeño del Cronograma (SPI). El cambio consiste en medir las variaciones del cronograma efectivamente en tiempo, y no en costo como lo realiza el Valor Ganado.

El Cronograma Ganado consiste en utilizar las curvas de Costo Planificado (PV) y Valor Ganado (EV), realizando proyecciones en un tiempo o periodo determinado de EV hacia PV, determinando un nuevo punto, mismo que al ser proyectado al eje del tiempo, refleja un valor de tiempo que corresponde a conseguir el trabajo planificado. Si la proyección es hacia la izquierda, significa que existe retraso, y si la proyección coincide hacia la derecha, significa que el proyecto presenta adelanto [23] [55].

La proyección se representa con la variable Cronograma Ganado (ES: Earned Schedule) a un tiempo determinado (AT: tiempo actual), como se muestra en el ejemplo de la Figura 2-11.

Figura 2-11: ejemplo gráfico del análisis del Cronograma Ganado



Dando una interpretación al ejemplo de la figura 10, el periodo de análisis (AT) corresponde al periodo 5, a partir del cual se realiza una proyección de la curva de EV a la curva de PV, y de este punto obtenido se proyecta hacia el eje del tiempo, obteniendo  $ES = 4$ .

Así, la nueva variación del cronograma  $SV = ES - AT = 4 - 5 = -1$ , lo que representa que el proyecto presenta un retraso de 1 periodo de tiempo.

El índice de desempeño del cronograma  $ISP = ES / AT = 4 / 5 = 0.8$

### 2.5.6 Opinión de expertos

No se ha encontrado bibliografía respecto a las metodologías usadas por las empresas fiscalizadoras en los proyectos hidroeléctricos desarrollados en el Ecuador, sin embargo, de las consultas realizadas a especialistas de estas empresas, la forma en la que en algunos proyectos se llevó, se describe a continuación:

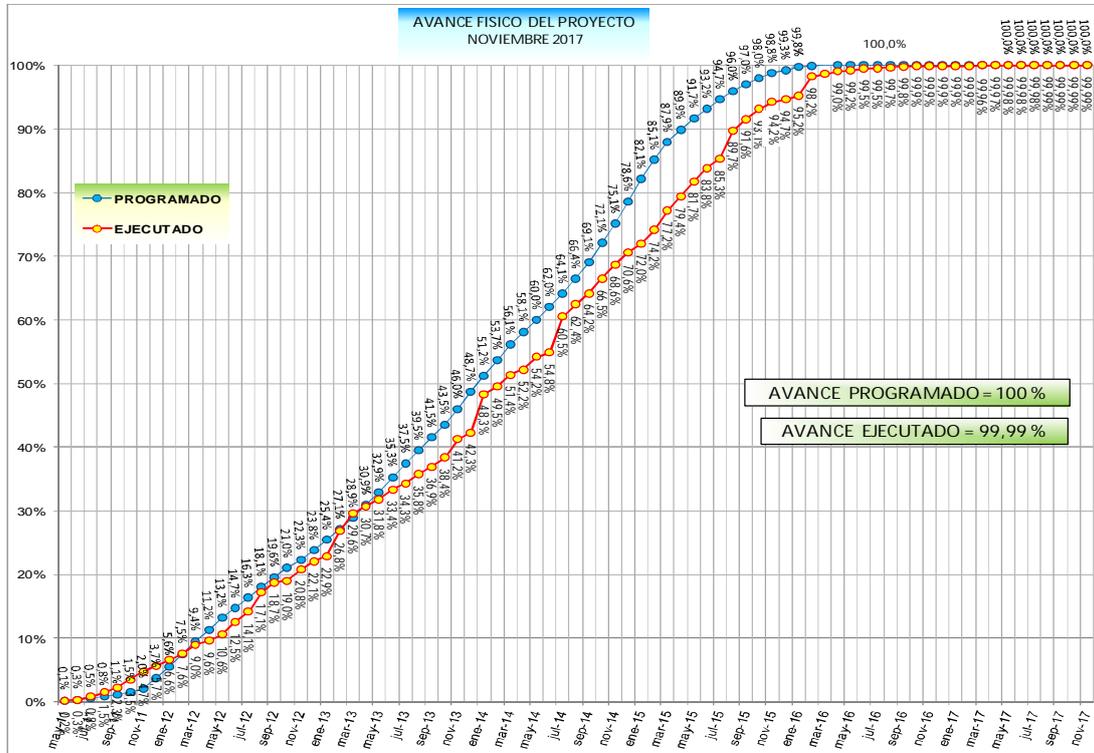
La línea base de la planificación se sustenta en una curva "S" construida con los costos ponderados acumulados del cronograma valorado del contrato.

En base a la "opinión de expertos" de la empresa fiscalizadora, se define un grupo de rubros o actividades del total de rubros del contrato. Este grupo de actividades es el que se usa para medición del avance, desechando el resto de rubros o actividades que de acuerdo a los expertos, no aportan valor a las métricas.

Al grupo de rubros escogidos se aplican las mediciones en campo (% de avance) y se pondera con el costo del contrato, generando una curva "S" de avance que luego es comparado con la curva de la línea base y se define avances o retrasos del proyecto.

En la Figura 2-12 se presenta un ejemplo de la curva "S" utilizada en la medición del avance físico del proyecto hidroeléctrico Sopladora.

Figura 2-12: Curva "S" del avance de un proyecto hidroeléctrico en el Ecuador



Fuente: [56]

### 2.5.7 Otras metodologías de apoyo

Existen otras metodologías, herramientas y diagramas, que si bien no se consideran como metodologías completas de seguimiento y control de proyectos en el sentido de brindar métricas de avance físico, financiero, y pronósticos de costo y plazo, sin embargo, estas herramientas se han constituido por décadas como base de apoyo dentro de las metodologías de seguimiento y control de proyectos, en especial en la etapa de planificación para la construcción de los cronogramas del proyecto. A continuación se realiza una breve descripción de las más importantes.

a. Diagrama de GANTT

El diagrama de Gantt es una herramienta desarrollada por Henry Laurence Gantt a inicios del siglo XX, y permite planificar y programar actividades en un periodo de tiempo determinado. Este diagrama representa gráficamente las tareas, su duración y secuencia, además del calendario general del proyecto. El diagrama se muestra en un gráfico de barras horizontales ordenadas por actividades a realizar en secuencias de tiempo concretas.

Los principales beneficios del diagrama de Gantt [57]:

- Simplifica la visualización de tareas y representa todas las etapas y actividades de un proyecto en un único diagrama.
- Permite administrar proyectos y a reducir problemas de programación.
- Permite identificar los puntos críticos.
- El diagrama de Gantt puede actualizarse en cualquiera de sus ejes, en todo momento.
- Existen gran cantidad de aplicaciones informáticas que permiten construir un diagrama de Gantt de manera directa y sencilla.

b. Estructura de Desglose de Trabajo

La estructura de desglose de trabajo (EDT o por sus siglas en inglés WBS), es la descomposición jerárquica del alcance del proyecto, en otras palabras, es el proceso de subdividir los entregables del proyecto y el trabajo del proyecto en componentes y subcomponentes más pequeños, de tal manera que permitan una mayor comprensión del alcance del proyecto. La EDT permite organizar y definir de mejor manera el alcance total del proyecto. En la Figura 2-13 se muestra un esquema de EDT.

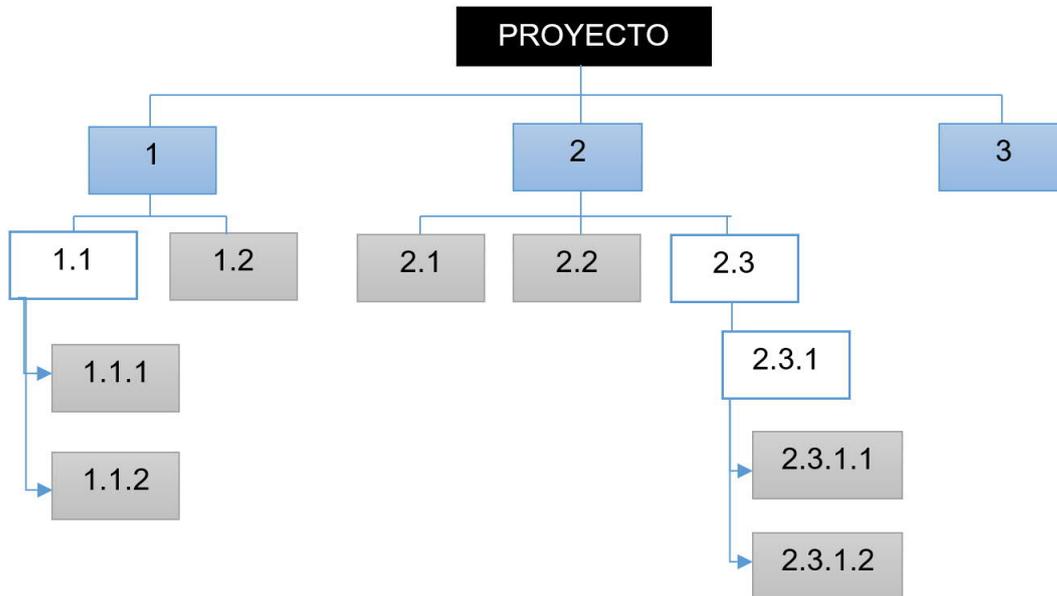
El nivel inferior de la EDT está conformado por los paquetes de trabajo, donde se contiene el trabajo planificado, es decir, las actividades programadas [18]. Se denomina "Cuenta de Control" al lugar en la EDT donde se mide el progreso del proyecto, y cada Cuenta de Control contiene uno o más paquetes de trabajo [23]. El paquete de trabajo es el trabajo definido en el nivel más bajo de la EDT donde se estima y gestiona el costo y la duración.

Para la construcción de la EDT se utiliza la técnica denominada "descomposición", que consiste en dividir y subdividir el alcance del proyecto y los entregables en partes más pequeñas y comprensibles. El nivel de descomposición y detalle para los paquetes de trabajo varía en función del tamaño y la complejidad del proyecto [7] [23].

El principal beneficio de la construcción de una EDT es que proporciona un marco de referencia de lo que se debe entregar, y por tanto, la EDT es la base fundamental para la estimación de tiempos, costos, recursos humanos y riesgos.

En proyectos complejos de construcción, es fundamental esta descomposición en componentes por la gran cantidad de entregables y subentregables que conforman este tipo de proyectos. La EDT debe ser desarrollada por los especialistas y expertos del equipo de trabajo a cargo del proyecto.

Figura 2-13: Esquema de Estructura de Desglose de Trabajo EDT



c. Cadena Crítica

El método de la Cadena Crítica (CCPM) fue desarrollado por Eliyahu M. Gondratt en 1997, y consiste en un procedimiento analítico de gestionar la incertidumbre de un proyecto en su etapa de planificación. Este método se basa en la programación del proyecto, requiriéndose que el cronograma se construya con el tiempo estrictamente necesario para cada actividad, sin resguardos, eliminando sus protecciones individuales y concentrando esta seguridad en determinados puntos clave del proyecto. Las actividades se protegen mediante amortiguadores que permiten defender la cadena crítica, aumentando la confianza en la fecha de conclusión de la misma [58].

El método de la Cadena Crítica es un método de gestión de proyectos basado en el enfoque sistemático de la teoría de las restricciones (TOC). Mejora el método de la Ruta Crítica.

Los cinco pasos que conforman el proceso de mejora continua de la TOC son los siguientes [59]:

- Identificar la limitación del sistema.
- Explotar la limitación.
- Subordinar el resto del sistema a la limitación.
- Aliviar la limitación.
- En caso de romperse la limitación, volver al paso 1.

En el sector de la construcción se tienen muchas experiencias del uso de CCPM como lo demuestran trabajos como los expuestos en [60] y [59].

#### d. Ruta Crítica

El método de la Ruta Crítica, también conocido como Camino Crítico (CPM), consiste en identificar cuáles son las actividades críticas que forman el camino más largo del proyecto, es decir, la Ruta Crítica implica que si alguna de las actividades de la conforman se retrasa, generaría retraso en la conclusión final del proyecto. El método de la Ruta Crítica permite calcular las fechas teóricas de inicio y finalización temprana y tardía para todas las actividades que conforman el cronograma, sin considerar las limitaciones de recursos, con un análisis que recorre hacia adelante y hacia atrás toda la red del cronograma. Las fechas de inicio y finalización temprana y tardías resultantes no constituyen el cronograma final, sino que más bien indican los periodos dentro de los cuales pueden planificarse las actividades, teniendo en cuenta las duraciones de las actividades, las relaciones lógicas, los adelantos, los retrasos y otras restricciones conocidas [23], [61].

## e. Método PERT

El método Program Evaluation and Review Technique (PERT) es una técnica que permite analizar la incertidumbre en los plazos de proyecto, calculando duraciones probabilísticas. La finalidad de PERT es conseguir una estimación del tiempo de ejecución del proyecto y de todas sus actividades. Es un insumo fundamental para los métodos de seguimiento y control de proyectos. El aporte fundamental del método PERT es el gráfico de red, donde se presentan los elementos básicos de las actividades y sus situaciones. En la elaboración del gráfico o diagrama de actividades, se descartará que actividades son susceptibles de desarrollo simultáneo o paralelo y cuáles han de ejecutarse sucesivamente.

El método PERT considera que la duración esperada de una actividad es una variable aleatoria de distribución de probabilidad Beta Unimodal [61]:

$$T_e = \frac{T_a + 4T_m + T_b}{6}$$

Ta: Duración optimista al menor tiempo que puede durar la actividad

Tm: Duración más probable que puede durar la actividad

Tb: Duración pesimista o de mayor tiempo de duración para la actividad

Te: Duración esperada

## f. Curva "S"

Las curvas "S" son curvas acumulativas trazadas en función del tiempo, pueden representar costos acumulados, avance físico en porcentaje, horas de trabajo,

entre otras. El nombre de curva "S" deriva de la forma de "S" de la curva, más plana al principio y al final, más pronunciada en el medio. La razón es que los proyectos comienzan lentamente cuando los recursos necesitan establecerse, y luego los proyectos comienzan a acelerarse una vez que se han adquirido todos los recursos.

Las curvas "S" son herramientas importantes para la planificación, seguimiento y control de proyectos. Proporcionan una base para la evaluación del progreso real del proyecto al permitir comparar curvas "S" de planificación contra curvas "S" de la ejecución real [62].

## 2.6 Aplicación en el Ecuador

De las metodologías desarrolladas en el numeral 4.1, se ha evidenciado que las metodologías más utilizadas en el Ecuador son las siguientes:

- Gobierno por Resultados GPR.- Aplicado por la Presidencia de la República para el seguimiento de portafolio de proyectos, donde se incluyen los proyectos hidroeléctricos, sin embargo, el sistema GPR realiza un seguimiento con índices generales que permite a las autoridades realizar un seguimiento puntual con periodos extensos de revisión, y no se utiliza y no es aplicable para un seguimiento y control permanente y continuo de un proyecto.
- Opinión de expertos.- Se ha evidenciado la aplicación de este tipo de metodologías en varios proyectos hidroeléctricos, sin embargo, no existe literatura definida ni soporte teórico, más bien son metodologías que se basan en la experiencia de los expertos y especialistas vinculados a la construcción del proyecto. Los resultados de este tipo de metodologías se

vuelven muy subjetivos y han generado discusiones entre las empresas contratistas y las empresas fiscalizadoras.

- Cronograma Valorado.- Este método, con su sencilla e intuitiva aplicación, ha tenido un gran desarrollado en el Ecuador. Su aplicación se ha extendido en términos generales a todo tipo de proyecto, desde proyectos pequeños hasta proyectos de gran envergadura.
- Valor Ganado.- Las fuertes corrientes del Project Management Institute en países sudamericanos han hecho que la técnica del Valor Ganado se vuelva popular y se haya desarrollado con fuerza en la gestión de proyectos. Adicional, como ya se analizó esta técnica en el numeral 4.1, esta técnica goza de un potente soporte técnico y matemático que brinda un grupo robusto de indicadores e índices para el seguimiento y control de proyectos.

Por otra parte, se ha realizado una revisión de la normativa ecuatoriana referente a las obligaciones que tiene la ejecución de proyectos de construcción respecto al seguimiento y control de los mismos. A continuación se expone esta revisión.

### 2.6.1 Normativa ecuatoriana en administración y fiscalización de proyectos de construcción

En la normativa legal vigente en el Ecuador, se determina de manera clara la obligación que tiene el Administrador de Contrato y la Fiscalización de la obra, a ejecutar tareas de seguimiento y control del proyecto. Se incita a realizar un seguimiento y control del avance físico, avance presupuestario, y de ruta crítica; así como se determina la obligación que tiene el Administrador de Contrato y la Fiscalización a emprender las acciones correctivas en caso de desviaciones a la

planificación. Sin embargo, la legislación no indica cómo se debe realizar estas actividades de seguimiento y control, es decir, no existe de manera explícita una metodología de seguimiento y control de proyectos que rijan en la contratación pública del país.

El cuerpo legal vigente en el Ecuador para la contratación y ejecución de proyectos de construcción está compuesto por:

- Ley Orgánica del Sistema Nacional de Contratación Pública
- Reglamento a la Ley Orgánica del Sistema Nacional de Contratación Pública
- Normas de Control Interno para las Entidades, Organismos del Sector Público y Personas Jurídicas de derecho privado que dispongan de recursos públicos

A continuación el análisis.

La Ley y su Reglamento

Esta ley fue establecida por el Sistema Nacional de Contratación Pública, aprobada a través del Registro Oficial Suplemento 395 del 04 de agosto de 2008, con su última modificación el 29 de diciembre de 2017.

El reglamento a la ley fue aprobado a través del Registro Oficial Suplemento 588 del 12 de mayo de 2009, con su última modificación el 08 de noviembre de 2016.

Esta Ley y su Reglamento determinan los principios y normas para regular los procedimientos de contratación para la adquisición o arrendamiento de bienes,

ejecución de obras y prestación de servicios, incluidos los de consultoría en el Ecuador.

En el artículo 80 de la Ley se establece:

“Art. 80.- Responsable de la Administración del Contrato.- El supervisor y el fiscalizador del contrato son responsables de tomar todas las medidas necesarias para su adecuada ejecución, con estricto cumplimiento de sus cláusulas, programas, cronogramas, plazos y costos previstos.”

En el artículo 121 del Reglamento se establece:

“Art. 121.- Administrador del contrato.- En todo contrato, la entidad contratante designará de manera expresa un administrador del mismo, quien velará por el cabal y oportuno cumplimiento de todas y cada una de las obligaciones derivadas del contrato. Adoptará las acciones que sean necesarias para evitar retrasos injustificados e impondrá las multas y sanciones a que hubiere lugar.”

El Sistema Nacional de Contratación Pública del Ecuador, en base a la Ley y su Reglamento, establece “modelos de pliegos”, que son documentos obligatorios donde se desarrollan: las especificaciones técnicas del proyecto, forma de pago, responsabilidades del contratista y contratante, y en general, las condiciones de como contratar y como llevar la ejecución del contrato.

A continuación la revisión del modelo de pliego de los procedimientos de licitación de obras vigente, donde se establecen las responsabilidades de las tareas de seguimiento y control del proyecto.

En las Condiciones particulares del pliego de licitación de obras, se tiene:

“...Además, el contratista presentará con las planillas el estado de avance del proyecto y un cuadro informativo resumen, que indicará, para cada concepto de trabajo, el rubro, la descripción, unidad, la cantidad total y el valor total contratado, las cantidades y el valor de los trabajos ejecutados hasta el periodo anterior, y en el período en consideración, y la cantidad y el valor de los trabajos acumulado hasta la fecha, incluyendo el valor de los rubros subcontratados. Estos documentos se elaborarán según el modelo preparado por la fiscalización y serán requisito indispensable para tramitar la planilla correspondiente.”

En las Condiciones general para la contratación de obras:

“... 1.19. Administración del contrato: La entidad contratante designará de manera expresa un administrador del contrato, quien velará por el cabal y oportuno cumplimiento de todas y cada una de las obligaciones derivadas del contrato. Adoptará las acciones que sean necesarias para evitar retrasos injustificados y aprobará las multas y/o sanciones a que hubiere lugar y que hubieran sido solicitadas o establecidas por la fiscalización, según lo dispone el artículo 121 del Reglamento General de la Ley Orgánica del Sistema Nacional de Contratación Pública.

El administrador del contrato velará porque la fiscalización actúe de acuerdo con las especificaciones constantes en el presente pliego y en el propio contrato; revisará las planillas aprobadas, previo a su autorización para la correspondiente gestión de pago.

1.21. Fiscalización: Las actividades de fiscalización, las cuales podrán ser contratadas en el caso de no disponer de personal calificado para el efecto, propenderán a la verificación y supervisión del uso de una adecuada técnica y correcta ejecución de la obra, en aplicación de los términos y condiciones previstos en

el contrato a fin de que el proyecto se ejecute de acuerdo a sus diseños definitivos, rubros contractuales, subcontratación, especificaciones técnicas, participación ecuatoriana mínima, cronogramas de trabajo, recomendaciones de los diseñadores, transferencia tecnológica, cuando corresponda, y normas técnicas aplicables, con sujeción a lo previsto en el contrato.

La fiscalización será responsable de asegurar el debido y estricto cumplimiento de las especificaciones técnicas de diseño y materiales por parte del contratista, debiendo en todo momento observar las que hacen parte de los diseños definitivos y el contrato. La fiscalización no podrá cambiar las especificaciones generales o técnicas de diseño o de materiales sin la justificación técnica correspondiente.”

Dentro de los formularios que son parte de los Modelos de Pliego se obliga a la presentación del cronograma valorado bajo el formato que se muestra en la Figura 2-14.

Figura 2-14: Modelo de Cronograma Valorado de trabajo establecido en el modelo de pliego de contratación de obras del Sistema Nacional de Contratación Pública del Ecuador

Rubro	Cantidad	Precio unitario	Precio total	Tiempo en (semanas, meses)												
				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Inversión mensual																
Avance parcial en %																
Inversión acumulada																
Avance acumulado en %																

Fuente: Pliego licitación de obras, formulario 1.8 de licitación de obras SERCOP

### Norma de Control Interno

En el Acuerdo 039 CG del 16 de noviembre de 2009, la Contraloría General del Estado del Ecuador, expide las Normas de Control Interno para las entidades, organismos del sector público y personas jurídicas de derecho privado que dispongan de recursos públicos.

Las normas de control interno son concordantes con el marco legal vigente y están diseñadas bajo principios administrativos, disposiciones legales y normativa técnica pertinente.

En estas Normas de Control Interno, de manera mucho más detallada y explícita se determina que en todo proyecto debe realizarse actividades de seguimiento y

control, incluso indica que se deben realizar cronogramas de barras donde se debe determinar la ruta crítica del proyecto.

A continuación los extractos principales de la Norma.

En cuanto a la programación de la obra, en su etapa de planificación:

“...408-12 Programación de la obra

La administración preparará un programa del avance físico de la obra, desglosándola en las actividades por realizar e indicando su respectiva duración y requerimiento de insumos: materiales, mano de obra, herramientas, maquinaria y equipos...”.

“...Para definir el plazo de ejecución empleará un método de programación por redes de actividades, que señale la ruta crítica y sirva como base para elaborar un diagrama de barras y diagrama de Gantt, en el cual se indiquen la duración, los tiempos tempranos y tardíos (de inicio y término) y las holguras de cada actividad.”

“...El método de programación por emplear en esta tarea será cualquier sistema de redes: CPM, PERT, diagrama de bloques, que ponga en relieve las actividades críticas. Además, con base en la red establecida, se elaborará el diagrama de barras correspondiente, diagrama de Gantt, indicando para cada actividad, su duración, los tiempos tempranos y tardíos de inicio y término, las holguras y el requerimiento de insumos: materiales, mano de obra, maquinaria y equipos.”

En cuanto al seguimiento y control del avance físico de la obra:

"...408-22 Control del avance físico.- El jefe de fiscalización velará por el cumplimiento del programa de ejecución establecido. De presentarse atrasos con respecto al programa, tomará las acciones necesarias para ajustar las actividades, de manera que, tan pronto como sea posible, vuelvan a desarrollarse de acuerdo con lo programado. Sin embargo, cuando los atrasos afecten la ruta crítica del proyecto, informará de inmediato al administrador del contrato, para que éste resuelva el problema oportunamente..".

"...El control del avance físico de la obra es responsabilidad del jefe de fiscalización como representante de la entidad. Es su deber establecer el grado de avance del proyecto y evaluar periódicamente el proceso constructivo en relación con lo programado. Deberá tomar previsiones para poder evaluar ese avance en cualquier instante...".

"...El jefe de fiscalización efectuará el control del avance físico por semana, pues de esta manera, al efectuar la medición en conjunto con el contratista, cotejará los datos obtenidos, que servirán para la revisión de las planillas de avance de obra y de los documentos de respaldo...".

"...El jefe de fiscalización establecerá las acciones a tomar cuando detecte atrasos con respecto al programa, pues de su oportuna aplicación depende la ejecución del proyecto en el plazo programado. Si el atraso es imputable al contratista y sobrepasa el límite establecido, holgura total, deberá advertirle mediante el libro de obra y comunicación escrita para que dentro de un plazo determinado, presente las medidas correctivas que aseguren la finalización del proyecto en el plazo convenido...".

En cuanto al seguimiento y control del avance presupuestario de la obra:

"...408-24 Control financiero de la obra.- El jefe de fiscalización evaluará en forma mensual, el avance financiero de la obra en relación con lo programado. De existir discrepancias, analizará su origen y tomará las acciones necesarias para corregir la situación. Asimismo, llevará el control del presupuesto asignado a la obra, de manera que en cualquier momento, pueda conocer con certeza el saldo de la asignación presupuestaria disponible...".

"...El resultado de la evaluación servirá para determinar si el monto acumulado de los gastos, corresponde al avance físico que debía haberse alcanzado a esa fecha; de no ser así, se estudiarán las causas y se tomarán las acciones correctivas necesarias...".

## Capítulo 3 Metodología

### 3.1 Introducción

En el Capítulo 2 se revisaron de las principales herramientas, técnicas y métodos existentes para ejecutar tareas de seguimiento y control de proyectos de cualquier tipo. Se presentaron técnicas que son avaladas por prestigiosos organismos de dirección de proyectos en todo el mundo.

En este Capítulo 3, en base a las técnicas, herramientas y metodologías investigadas y que han sido aplicadas en la dirección de proyectos de todo tipo a través de la historia en todo el mundo, se propone un método de seguimiento y control específico para proyectos complejos de construcción.

El método se desarrolla de manera detallada, presentando las ecuaciones para el cálculo de las diferentes métricas, y para su mayor comprensión se presenta un proyecto- ejemplo básico que permite el entendimiento de la aplicación de este método.

Por otra parte, como desarrollo fundamental de este Capítulo 3, se describe y desarrolla la metodología matemática-estadística, que permite comprobar la aplicabilidad, consistencia y eficiencia del método de seguimiento y control que propone esta tesis.

En el Capítulo 4 se presentan casos de estudio con la aplicación de la metodología en proyectos complejos de construcción en el sector hidroenergético, realizando la comprobación de hipótesis que demuestren estadísticamente la aplicabilidad, consistencia y eficiencia de la metodología planteada.

### 3.2 Desarrollo de la metodología de seguimiento y control de proyectos complejos de construcción

Un proyecto es exitoso cuando cumple los siguientes requisitos establecidos en su planificación:

- a) Alcance de calidad
- b) Plazo
- c) Presupuesto
- d) Beneficios del proyecto (Objetivos del cliente)
- e) Sostenibilidad

De estos requisitos, el alcance, el plazo y el presupuesto, se evalúan durante la ejecución del proyecto; mientras que, los beneficios del proyecto y sostenibilidad son evaluados posterior a la conclusión del proyecto.

Por otra parte, las principales restricciones interdependientes que tiene todo proyecto son: el alcance, el tiempo, el costo y el nivel de riesgo. Si durante la ejecución del proyecto, una de estas restricciones presenta variación, generará variaciones en las otras restricciones, situación que causaría impactos en la planificación inicial del proyecto, tales como: cambio del alcance del proyecto y/o sobrecostos y/o sobreplazos.

De este comportamiento que presentan las restricciones de un proyecto, y de los requisitos principales que cumple un proyecto exitoso, se deduce la importancia de evaluar y monitorizar el alcance, el tiempo y el costo de un proyecto durante su ejecución. Por tanto, una metodología de seguimiento y control en la ejecución del proyecto debe considerar dentro de sus cálculos y métricas periódicas, las variables fundamentales: costos, tiempo y alcance del proyecto, sin descuidar la evaluación de las actividades expuestas a mayor riesgo de sobrecostos y/o sobreplazos.

En este contexto, el método de seguimiento y control para proyectos complejos de construcción deberá contar con:

- Líneas base de la planificación: avance físico, presupuestario y ruta crítica.
- Medición del avance físico
- Medición del avance presupuestario
- Medición del avance de la ruta crítica
- Comparativa entre avances medidos con las líneas base
- Indicadores de avance
- Pronósticos de costos y plazos

En este contexto, la metodología que se plantea en esta tesis presenta métricas que consideran cuatro criterios fundamentales:

- El costo de cada actividad involucrada en el proyecto "C".
- El tiempo o plazo de ejecución de cada actividad involucrada en el proyecto "T".
- La criticidad de las actividades que pudieran generar sobre costo y/o sobreplazo en la ejecución del proyecto "C" (actividades en ruta crítica).
- Las actividades que presentan mayor riesgo en generar sobre costo y/o sobreplazo en la ejecución del proyecto "R".

En consecuencia, la metodología planteada se basa en el Costo, Tiempo, Criticidad y Riesgos. De aquí en adelante se le denomina como "metodología CTCR".

A continuación se desarrolla este contenido.

### 3.2.1 Línea Base

En materia de seguimiento y control de un proyecto, la Línea Base se puede definir como la planificación de objetivos en relación a los plazos. Esta

planificación servirá para el seguimiento del proyecto a través de comparaciones periódicas entre los objetivos alcanzados durante la ejecución del proyecto y los objetivos planificados. Para que las actividades de comparación sean viables, los objetivos de la línea base deben ser medibles y cuantificables. Considerando la triple restricción básica a la que se encuentra sometido todo proyecto, se debe considerar líneas base que permitan el seguimiento y control de: costos, plazos y alcance.

La metodología CTCR de seguimiento y control propone la construcción de tres líneas base que permiten el seguimiento de tres variables básicas:

- Línea base del avance físico (alcance)
- Línea base del avance presupuestario (costos)
- Línea base de la ruta crítica (plazos)

a. Línea base del avance físico

La línea base del avance físico permite dar un seguimiento al cumplimiento del alcance del proyecto de manera periódica. Se define la línea base, otorgando pesos ponderados a cada una de las actividades que conforman el cronograma del proyecto, consiguiendo al final un valor porcentual distribuido en el tiempo, con un valor de 0% al inicio y un 100% al final.

El peso ponderado para cada actividad se calculó con la interacción de cuatro criterios que llevan relación directa con las principales restricciones de todo proyecto, es decir:

- Los costos estimados para cada una de las actividades del programa del proyecto.

- Los tiempos de ejecución estimados para cada una de las actividades del programa del proyecto.
- El plazo estimado total de ejecución del proyecto, evaluado a través de la interacción entre los plazos exclusivos de las actividades que se encuentran en la Ruta Crítica del cronograma.
- Riesgos de sobreplazos y sobrecostos, evaluados exclusivamente en las actividades de mayor riesgo en generar sobreplazos y/o sobrecostos en el proyecto.

En proyectos de construcción complejos, se presentan diferencias significativas en cuanto al costo, al plazo, criticidad de actividades y a los riesgos que presentan las actividades que conforma la programación del proyecto. Esta situación hace que en el seguimiento y control de un proyecto de construcción complejo debe considerarse la ponderación de estos cuatro criterios.

Para vincular los cuatro criterios, se propone aplicar la Ecuación 1 que otorga un peso a cada actividad vinculando su costo, su tiempo, su criticidad y sus actividades de mayor riesgo:

Ecuación 1

$$P_i = k1 \times \frac{C_i}{\sum_{i=1}^n C_i} + k2 \times \frac{T_i}{\sum_{i=1}^n T_i} + k3 \times \frac{RC_i}{\sum_{i=1}^m RC_i} + k4 \times \frac{R_i}{\sum_{i=1}^s R_i}$$

Donde:

i = número de actividad del cronograma

P<sub>i</sub> = Peso ponderado de la actividad "i" en (%).

$K_{1,2,3,4}$  = Coeficientes adimensionales de ponderación de pesos para los criterios: tiempo, costo, criticidad y riesgo. Los valores se ponderarán en base a un análisis multicriterio que se desarrolla en el numeral 3.2.7.

$C_i$  = Costo planificado de la actividad "i" (valor monetario).

$T_i$  = Tiempo planificado de ejecución de la actividad "i" (unidades de tiempo).

$RC_i$  = Tiempo planificado de ejecución de la actividad "i" en ruta crítica (unidades de tiempo).

$R_i$  = Riesgo de generar sobrecosto y/o sobreplazo en el proyecto de la actividad "i", ponderado en actividades específicas de mayor riesgo del cronograma.

$n$  = Número total de actividades que conforman el cronograma del proyecto.

$m$  = Número total de actividades en ruta crítica.

$s$  = Número total de actividades de mayor riesgo de sobrecosto y/o sobreplazo.

La Ecuación 1 genera el peso ponderado para cada actividad específica, sin embargo, para calcular el avance físico de línea base, es necesario vincular el peso a todas las actividades del cronograma que intervienen en cada periodo de tiempo. Lo dicho se consiguió con la Ecuación 2.

Ecuación 2

$$A_{físico\ planificado\ i} = k1 \times \frac{\sum_{i=1}^n C_i}{C_T} + k2 \times \frac{\sum_{i=1}^n T_i}{T_T} + k3 \times \frac{\sum_{i=1}^n RC_i}{RC_T} + k4 \times \sum_{i=1}^n R_i$$

Donde:

$i$  = periodo de tiempo de la evaluación.

$A_{\text{físico planificado } i}$  = Avance físico del proyecto en el periodo "i".

$K_{1,2,3,4}$  = Coeficientes adimensionales de ponderación de pesos para los criterios: tiempo, costo, criticidad y riesgo. Los valores se ponderarán en base a un análisis multicriterio que se desarrolla en el numeral 3.2.7.

$C_i$  = Costo planificado acumulado en el periodo "i".

$C_T$  = Costo total planificado.

$T_i$  = Esfuerzo acumulado en periodos de tiempo de todas las actividades planificadas a ejecutarse hasta el periodo "i".

$T_T$  = Esfuerzo total resultante de la sumatoria de los periodos de tiempo planificados de todas las actividades que conforman el proyecto (no es el plazo del proyecto).

$RC_i$  = Esfuerzo acumulado en periodos de tiempo de todas las actividades en ruta crítica planificadas a ejecutarse hasta el periodo "i".

$RC_T$  = Esfuerzo total resultante de la sumatoria de los periodos de tiempo planificados de todas las actividades en ruta crítica que conforman el proyecto.

$R_i$  = Riesgo acumulado en el periodo "i".

b. Línea base del avance presupuestario

La línea base del avance presupuestario permite dar un seguimiento al cumplimiento de los costos del proyecto de manera periódica. Se definió la línea base, otorgando pesos ponderados a cada una de las actividades que conforman el cronograma del proyecto, consiguiendo al final un valor monetario distribuido

en el tiempo, con un valor monetario de 0 al inicio y un costo total del presupuesto al final.

Para calcular el avance presupuestario de línea base, es necesario vincular el peso a todas las actividades del cronograma que intervienen en cada periodo de tiempo. Lo dicho se consiguió con la Ecuación 3.

Ecuación 3

$$A_{\text{presupuestario planificado } i} = \sum_{j=1}^n C_j$$

Donde:

$A_{\text{presupuestario planificado } i}$  = Avance presupuestario planificado del proyecto en el periodo "i" (valor monetario).

i = periodo de la evaluación.

j = número de actividad involucrada en el periodo "i" de evaluación.

C = Costo planificado total de las actividades en el periodo "i" (valor monetario).

n = Número total de actividades planificadas para el periodo "i" (unidades de tiempo).

c. Línea base de la ruta crítica

La línea base de la ruta crítica permite dar un seguimiento al cumplimiento del plazo del proyecto de manera periódica. Se definió la línea base, otorgando pesos ponderados exclusivamente a las actividades que se encuentran en ruta crítica en el cronograma del proyecto, consiguiendo al final un valor porcentual distribuido en el tiempo, con un valor de 0% al inicio y un valor del 100% al final.

El avance planificado de cumplimiento de la ruta crítica para cada periodo se lo calculó en base a los tiempos proyectados para cada actividad de ruta crítica del cronograma, como lo representa la Ecuación 4.

Ecuación 4

$$A_{Ruta\ Crítica\ Planificada\ i} = 100 \times \frac{R_i}{\sum_{j=1}^n R_j}$$

Donde:

$A_{Ruta\ Crítica\ Planificada\ i}$  = Avance planificado del cumplimiento de la ruta crítica en el periodo "i" de evaluación (en %).

i = periodo de la evaluación.

j = número de actividad en ruta crítica involucrada en el periodo "i" de evaluación.

R = Tiempo planificado de las actividades en ruta crítica (unidades de tiempo).

n = Número total de actividades en ruta crítica del cronograma del proyecto.

Con el análisis expuesto, quedan definidas las Líneas Base del avance físico, del avance presupuestario y del avance de ruta crítica. Estas métricas reflejan la planificación periódica del alcance, de los costos y de los plazos del proyecto respectivamente. Ahora, para continuar con el seguimiento y control del proyecto, es preciso definir la metodología de definición de los avances reales del proyecto para compararlos con las líneas base. A continuación se desarrollan estas metodologías.

### 3.2.2 Medición del avance físico

La evaluación periódica del avance físico real del proyecto se sustenta en las métricas siguientes:

- Medición física del avance de cada actividad concluida dentro el cronograma del proyecto, medido en (%). Estas mediciones se las realiza en sitio de obra por personal especialista. Esta es una de las tareas más complejas y fundamentales para tener resultados óptimos al aplicar la metodología de seguimiento y control.
- Costos, tiempos y actividades de ruta crítica planificadas en el cronograma del proyecto.

Al disponer de estos datos, es posible calcular el avance real del proyecto en cada periodo evaluado, esto a través de la Ecuación 5 donde, al igual que al definir la línea base del avance físico, se involucran las variables: costo, tiempo, ruta crítica, y riesgos de sobrecosto y/o sobreplazo.

Ecuación 5

$$A_{físico\ real\ i} = k1 \times \frac{\sum_{i=1}^n A_{Ri} \times C_i}{C_T} + k2 \times \frac{\sum_{i=1}^n A_{Ri} \times T_i}{T_T} + k3 \times \frac{\sum_{i=1}^n A_{Ri} \times RC_i}{RC_T} + k4 \times \sum_{i=1}^n A_{Ri} \times R_i$$

Donde:

i = periodo de tiempo de la evaluación.

$A_{físico\ real\ i}$  = Avance físico real del proyecto en el periodo "i" (en %).

$K_{1,2,3,4}$  = Coeficientes adimensionales de ponderación de pesos para los criterios: tiempo, costo, criticidad y riesgo. Los valores se ponderarán en base a un análisis multicriterio que se desarrolla en el numeral 3.2.7.

$A_R$  = Avance real de la obra en el periodo "i".

$C_i$  = Costo planificado acumulado en el periodo "i".

$C_T$  = Costo total planificado.

$T_i$  = Esfuerzo acumulado en periodos de tiempo de todas las actividades planificadas a ejecutarse hasta el periodo "i".

$T_T$  = Esfuerzo total resultante de la sumatoria de los periodos de tiempo planificados de todas las actividades que conforman el proyecto (no es el plazo del proyecto).

$RC_i$  = Esfuerzo acumulado en periodos de tiempo de todas las actividades en ruta crítica planificadas a ejecutarse hasta el periodo "i".

$RC_T$  = Esfuerzo total resultante de la sumatoria de los periodos de tiempo planificados de todas las actividades en ruta crítica que conforman el proyecto.

$R_i$  = Riesgo acumulado en el periodo "i".

$n$  = Número total de periodos a la fecha de evaluación.

### 3.2.3 Medición del avance presupuestario

La evaluación periódica del avance presupuestario real del proyecto se sustenta en las métricas siguientes:

- Ejecución financiera real periódica del proyecto
- Planificación de los costos y el cronograma del proyecto.

Disponiendo de estos datos, es posible calcular el avance presupuestario real del proyecto en cada periodo evaluado. Para calcular el avance real presupuestario en un periodo de evaluación, se construye métricas del costo realmente ejecutado de manera periódica y acumulada. Lo dicho se consiguió con la Ecuación 6.

$$A_{presupuestario\ real_i} = \sum_{j=1}^n C_{Rj}$$

Donde:

$A_{presupuestario\ real\ i}$  = Avance presupuestario real del proyecto en el periodo "i" (valor monetario).

i = periodo de la evaluación.

j = número de actividad involucrada en el periodo "i" de evaluación.

$C_R$  = Costo total real de las actividades en el periodo "i" (valor monetario).

n = Número total de actividades planificadas para el periodo "i" (unidades de tiempo).

### 3.2.4 Medición del avance de la ruta crítica

La evaluación periódica del avance real de la ruta crítica del proyecto se sustenta en las métricas siguientes:

- Medición física del avance de cada actividad concluida dentro el cronograma del proyecto, medido en (%). Estas mediciones se las realiza en sitio de obra por personal especialista. Esta es una de las tareas más complejas y fundamentales para tener resultados óptimos al aplicar la metodología de seguimiento y control.
- Tiempos de actividades de ruta crítica planificadas en el cronograma del proyecto.

Disponiendo de estos datos, es posible calcular el avance real de la ruta crítica del proyecto en cada periodo evaluado, esto a través de la Ecuación 7.

Ecuación 7

$$A_{Ruta\ Crítica\ Real\ i} = 100 \times \frac{A_{Ri} \times R_i}{\sum_{j=1}^n R_j}$$

Donde:

$A_{Ruta\ Crítica\ Real\ i}$  = Avance real del cumplimiento de la ruta crítica en el periodo "i" de evaluación (en %).

i = periodo de la evaluación.

j = número de actividad en ruta crítica involucrada en el periodo "i" de evaluación.

$A_R$  = Avance real de las actividades de obra en ruta crítica en el periodo "i".

R = Tiempo planificado de las actividades en ruta crítica (unidades de tiempo).

n = Número total de actividades en ruta crítica del cronograma del proyecto.

### 3.2.5 Proyección de costos

La proyección periódica del costo a la conclusión del proyecto se sustenta en la técnica EVM, y se basa en las métricas siguientes:

- Medición física del avance de cada actividad concluida dentro el cronograma del proyecto, medido en (%). Estas mediciones se las realiza en sitio de obra por personal especialista.
- Costos, tiempos y actividades planificadas y realmente ejecutadas del proyecto.

Al disponer de estos datos, y de acuerdo a EVM, es posible calcular una proyección de los costos a la conclusión del proyecto. En el numeral 2.7.4 del Capítulo 2 se desarrolla EVM, donde las proyecciones de los costos se fundamentan en las métricas siguientes.

$$EAC = BAC / CPI$$

Donde:

EAC: es la estimación a la conclusión. Por sus siglas en ingles sería Estimate at completion.

BAC: Presupuesto. Por sus siglas en ingles sería Budget at completion.

CPI: Índice de desempeño del costo. Por sus siglas en ingles sería Cost Performance Index.

En la Ecuación 8, se acoge el criterio de EVM para la proyección de los costos que puede ser aplicado de manera periódica durante la ejecución del proyecto.

Ecuación 8

$$P_{Costos_i} = P_T \times \frac{\sum_{j=1}^n C_{Rj}}{\sum_{j=1}^n A_{Rj} \times C_{Pj}}$$

Donde:

$P_{Costos_i}$  = Proyección del costo a la conclusión del proyecto, realizado en el periodo "i" de evaluación (en valor monetario).

i = periodo de la evaluación.

j = número de actividades ejecutadas hasta el periodo "i" de evaluación.

$P_T$  = Presupuesto total del proyecto.

$C_R$  = Costo real ejecutado de cada actividad hasta el periodo "i" (en valor monetario).

$C_P$  = Costo planificado de cada actividad hasta el periodo "i" (en valor monetario).

$A_R$  = Medición de avance de cada actividad en obra (en %).

n = Número total de actividades ejecutadas hasta el periodo "i" de evaluación.

En [63] se presenta un estudio desarrollado por el autor de esta Tesis Doctoral, donde se demuestra la eficiencia de EVM en cuanto al pronóstico de costos al aplicado en proyectos complejos de construcción.

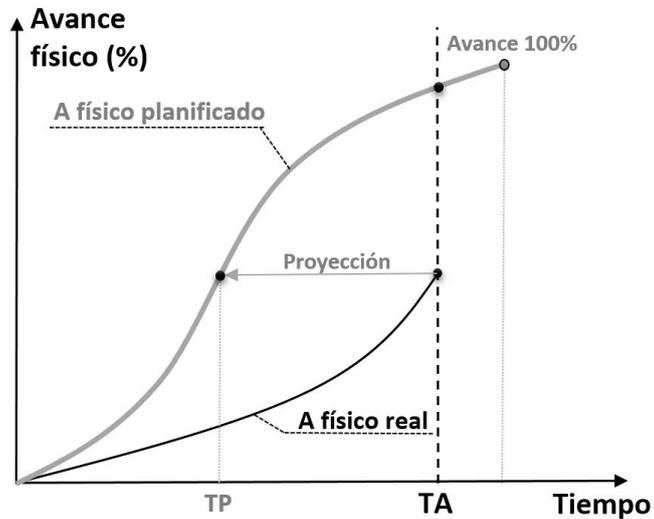
### 3.2.6 Proyección de tiempo

La proyección periódica del tiempo a la conclusión del proyecto se sustenta en las métricas siguientes:

- Medición del Avance físico real y su curva Avance real vs tiempo, que se va generando periódicamente. Se basa en la Ecuación 5.
- Línea base del Avance físico planificado y su curva Avance planificado vs. Tiempo. Se basa en la Ecuación 2.

Al disponer de estos datos, es posible calcular la proyección horizontal del Avance físico real sobre el Avance físico planificado, resultando un valor en unidades de tiempo que indican si el proyecto va adelantado o retrasado en su ejecución. Lo dicho se presenta en la Figura 3-1.

Figura 3-1: Proyección del tiempo



En la Ecuación 9 se presenta el cálculo de la proyección.

Ecuación 9

$$P_{Tiempo_i} = T_A - T_P$$

Donde:

$P_{Tiempo_i}$  = Proyección del tiempo a la conclusión del proyecto, realizado en el periodo "i" de evaluación (en unidades de tiempo).

i = periodo de la evaluación.

$T_A$  = Tiempo actual de evaluación en el periodo "i".

$T_P$  = Tiempo proyectado en el Avance físico planificado.

### 3.2.7 Adaptación del Analytic Hierarchy Process para la ponderación de los factores K

Para la ponderación de los factores K que introducen un peso relativo a los componentes: costo, tiempo, ruta crítica y riesgo de sobrecosto y/o sobreplazo de la Ecuación 2 y Ecuación 6 de seguimiento y control de proyectos propuesta

en esta tesis, se ha estructurado un modelo de decisión Analytical Hierachy Process (AHP).

El Proceso Analítico Jerárquico permite formalizar la comprensión intuitiva de problemas complejos mediante la construcción de un modelo jerárquico. En su forma general, el AHP es un marco no lineal para llevar a cabo tanto el pensamiento deductivo como el inductivo sin utilizar el silogismo tomando en consideración varios factores simultáneamente y permitiendo la dependencia y la retroalimentación, y haciendo concesiones numéricas para llegar a una síntesis o conclusión [64] [65] [66] [67].

Dentro de las principales ventajas que presenta el método AHP se tienen [68]:

- Presenta un sustento matemático.
- Permite desglosar y analizar un problema por partes.
- Permite la participación de diferentes personas o grupos de interés y genera un consenso.
- Permite incorporar aspectos cualitativos que suelen quedarse fuera del análisis debido a su complejidad para ser medidos, pero que pueden ser relevantes en algunos casos.
- Permite verificar el índice de consistencia y hacer correcciones, si es necesario.
- Genera una síntesis y da la posibilidad de realizar análisis de sensibilidad.
- Es de fácil aplicación y permite que su solución se pueda complementar con métodos matemáticos de optimización.

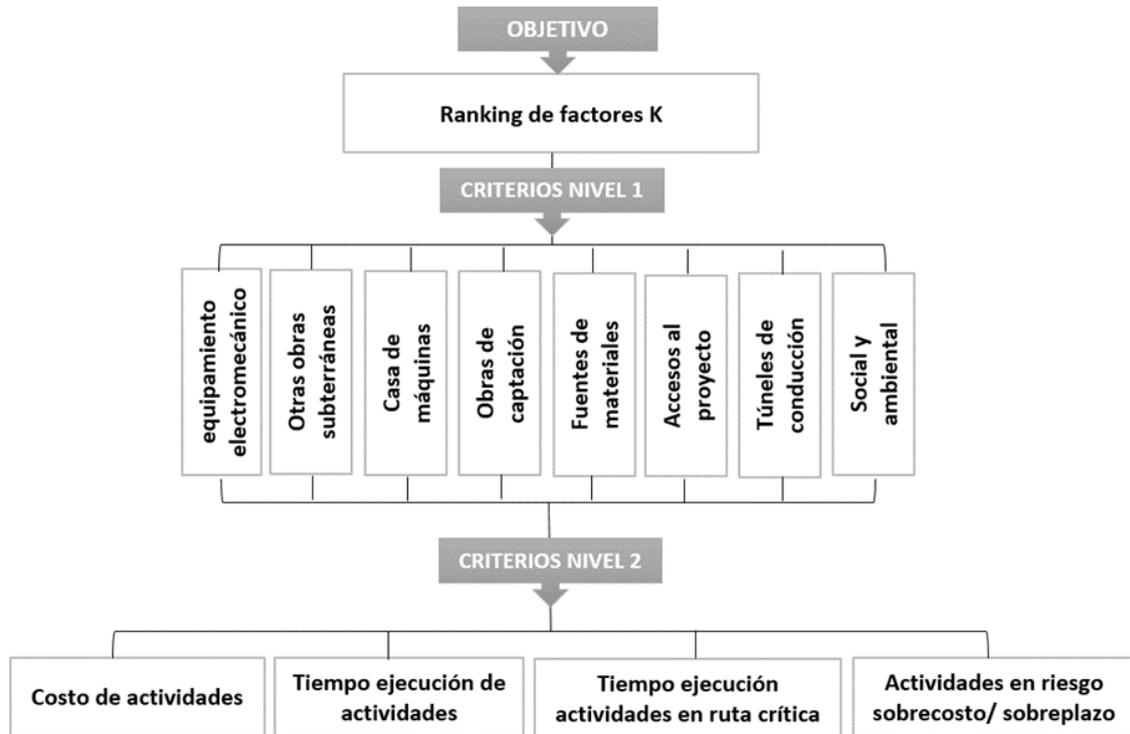
Las principales etapas que se presentan en el AHP son:

- Estructuración del modelo jerárquico (representación del problema mediante identificación de meta, criterios, subcriterios y alternativas).
- Priorización de los elementos del modelo jerárquico.
- Comparaciones pareadas entre los elementos.
- Evaluación de los elementos mediante la asignación de “pesos”.
- Ranking de las alternativas de acuerdo con los pesos dados.
- Síntesis.
- Análisis de Sensibilidad.

El método AHP utiliza un nivel de criterios y un nivel de alternativas, sin embargo, para el uso de la investigación de esta Tesis Doctoral, es necesario introducir una adaptación al método AHP, esta adaptación implica mantener dos niveles de criterios eliminando el nivel de alternativas. Lo dicho se sustenta en que los factores K no tiene el carácter de aplicación alternativa, más bien representan ponderaciones del: tiempo, costo, criticidad y riesgos de las actividades de un proyecto, que son criterios de aplicación obligatoria en el método de seguimiento y control de proyecto pero con distinto peso y ponderación.

La estructura del modelo AHP utilizada en esta Tesis Doctoral para la generación de los factores K se presenta en la Figura 3-2, donde se definen los dos niveles de criterios a considerar para llegar al ranking de los factores K.

Figura 3-2: Estructura de modelo de decisión AHP para factores K



Criterios Nivel 1 del modelo. En la Tabla 3-1 se presentan ocho criterios para el análisis de la importancia de las alternativas. La definición de los criterios del nivel 1 deben ser definidos en base a las condiciones propias y particulares de cada proyecto hidroeléctrico, y en base al criterio de expertos en este tipo de proyectos. Para el caso de esta Tesis Doctoral, estos criterios nivel 1 fueron definidos en base al análisis del autor de la Tesis con 18 años de experiencia en el sector hidroeléctrico de la República del Ecuador.

Tabla 3-1: Criterios Nivel 1 de importancia de las alternativas

No.	Criterio	Consideraciones
1	Equipamiento electromecánico	Se valora la importancia considerando la complejidad del equipamiento electromecánico en su: construcción, transporte, montaje, etc.
2	Obras subterráneas adicionales	Se valora la importancia considerando si existen otras obras subterráneas con complejidad técnica para la construcción como: túneles de desvío, túneles de accesos, cámara de interconexión, etc.
3	Casa de máquinas	Se valora la importancia considerando si la infraestructura de la casa de máquinas: es subterránea, geología de implantación, obras requeridas de sostenimiento, etc.
4	Obras de captación	Se valora la importancia considerando si el proyecto tiene represa, y en base a la complejidad técnica de las obras de captación.
5	Fuentes de materiales	Se valora la importancia considerando la existencia de fuentes de materiales principales de construcción como: arena, grava, piedra, etc. Dentro de la zona de influencia del proyecto. Se tendrá en cuenta además, la distancia de las fuentes de materiales hasta los diferentes sitios de obra.
6	Accesos al proyecto	Se valora la importancia considerando: la existencia de accesos a los diferentes frentes de obra, distancia de accesos entre frentes de obra y otras infraestructuras necesarias para la construcción de la central, estado de las vías de acceso, etc.

7	Túneles de conducción	Se valora su importancia considerando si el proyecto hidroeléctrico tiene túneles de conducción, considerando la longitud, geología, obras de sostenimiento, etc.
8	Componente social y/o ambiental	Se valora la importancia considerando la complejidad y problemáticas tratadas en el estudio ambiental del proyecto como: zonas protegidas, comunidades étnicas, etc.

Crterios Nivel 2 del modelo. En la Tabla 3-2 se presentan los criterios del modelo que representan los factores K de ponderación del: costo, tiempo, ruta crítica y riesgos.

Tabla 3-2: Criterios Nivel 2

No	Criterio	Consideraciones
1	Costo de actividades	Se refiere a la ponderación del costo acumulado de todas las actividades planificadas en el cronograma y distribuidas en el tiempo de ejecución del proyecto de manera periódica.
2	Tiempo de ejecución de las actividades	Se refiere a la ponderación del tiempo acumulado de todas las actividades planificadas en el cronograma y distribuidos periódicamente.
3	Tiempos de actividades en Ruta Crítica	Se refiere a la ponderación del tiempo acumulado de las actividades exclusivas que se encuentran en la Ruta Crítica y distribuidas periódicamente.
4	Actividades con mayor riesgo de	Se refiere a la ponderación de del riesgo a sobre costo y/o sobreplazo de las actividades del cronograma.

	sobrecosto y/o sobreplazo	
--	------------------------------	--

La aplicación de la adaptación del método AHP, se fundamenta en un trabajo de cálculos matriciales que se describe a continuación:

### Comparación por pares

Se inicia el proceso realizando comparaciones entre criterios, tanto del nivel 1 como del nivel 2, otorgando valores numéricos en base a escalas de razón propuestas por Saaty [69] en términos de preferencia, importancia o probabilidad. La escala propuesta por Saaty se muestra en la Tabla 3-3, donde A y B son los criterios.

Tabla 3-3: Escala fundamental de Saaty para el método AHP. Adaptada de [66]

Planteamiento verbal de la preferencia	Calificación numérica
A es extremadamente preferible a B	9
A es entre muy fuerte y extremadamente preferible a B	8
A es muy fuertemente preferible a B	7
A es entre fuerte y muy fuertemente preferible a B	6
A es fuertemente preferible a B	5
A es entre moderada y fuertemente preferible a B	4
A es moderadamente preferible a B	3
A es entre igual y moderadamente preferible a B	2
A es igualmente preferible a B	1

Al realizar la comparación de los criterios, se obtienen matrices de comparación por pares, que son matrices cuadradas que contienen comparaciones pareadas de los criterios, tanto del nivel 1 como del nivel 2.

La aplicación de la escala de Saaty se la realiza a través de juicios establecidos por información científica y técnica, y por la experiencia y conocimientos del equipo multidisciplinario decisor.

## Síntesis

El cálculo de la prioridad de cada criterio comparado se denomina "síntesis", y se la obtiene con el cálculo de vectores característicos. En resumen son los siguientes pasos algebraicos [68] [70] [71]:

- Se realizan las sumatorias de las columnas de la matriz de comparaciones pareadas.
- Se construye la matriz de comparaciones pareadas normalizada, a través de la división de cada elemento de la matriz entre el total de sumatoria del paso anterior.
- Se calcula el promedio de cada fila de la matriz normalizada, que es la ponderación o "síntesis".

## Matriz de prioridades

Con los resultados de las matrices de comparación pareada de criterios, tanto de nivel 1 y nivel 2, es posible construir la matriz de prioridades. La matriz de prioridades es aquella que resume las prioridades para cada criterio nivel 2 en términos de cada criterio nivel 1.

## Consistencia

El método AHP permite calcular la consistencia de los valores asignados para las matrices de comparación pareada, a través de la designación de una consistencia aceptable calculada. Esto se lo realiza con los siguientes índices [68] [70] .

$$RC = \frac{IC}{IA}$$

Donde:

- RC: Razón de consistencia
- IC: Índice de consistencia
- IA: Índice de consistencia aleatorio

El índice de consistencia es calculado con la siguiente ecuación:

$$IC = \frac{n_{max} - n}{n - 1}$$

Donde:

- nmax: calculado a través de la sumatoria del vector resultante de la multiplicación entre la matriz de comparación y el vector "síntesis"
- n: número de criterios

El Índice de Consistencia Aleatorio, es calculado con la siguiente ecuación:

$$IA = 1.98 \times \frac{n - 2}{n}$$

Donde:

- n: número de criterios

Al final se considera que la matriz tiene una consistencia aceptable cuando RC es igual o menor a 0.10. Cuando los valores de RC son mayores a 0.10 se considera que los juicios son inconsistentes.

### 3.2.8 Ejemplo básico de aplicación

Como explicación adicional a la metodología desarrollada en los numerales 3.2.1 al 3.2.7 y sus ecuaciones, se presenta a continuación un ejemplo básico que permitirá una mayor comprensión.

#### a. Aplicación de la línea base del avance físico

Para explicar la Ecuación 2, se presenta en la Tabla 3-4 un ejemplo básico de un cronograma de proyecto conformado por 5 actividades (A, B, C, D y E) distribuidas en cinco periodos de tiempo (T1, T2, T3, T4 y T5).

Tabla 3-4: Cronograma de proyecto de ejemplo básico

Actividad	T1	T2	T3	T4	T5
A	5				
B		10	5		
C		5	5	5	
D	5	5			
E			10	10	10
Costo periodo (\$)	10	20	20	15	10
Costo acumulado (\$)	10	30	50	65	75
Esfuerzo diario (Tiempo)	2	3	3	2	1
Esfuerzo acumulado (Tiempo)	2	5	8	10	11
Esfuerzo critico (tiempo)	1	1	1	1	1
Esfuerzo critico acumulado (tiempo)	1	2	3	4	5

En la fila de "Costo periodo (\$)", se presenta la sumatoria del costo programado para todas las actividades que tienen incidencia en cada periodo. Por ejemplo para el periodo T4, se tiene incidencia económica de las tareas C y E cuya suma sería  $\$5 + \$10 = \$15$ .

En la fila de "Costo acumulado (\$)", se presenta la acumulación económica diaria de los valores calculados en la fila "Costo diario (\$)", teniendo un costo total acumulado en el periodo T5 de  $\$10 + \$65 = \$75$ .

En la fila de "Esfuerzo diario (Tiempo)", se presenta la sumatoria del esfuerzo medido en periodos de tiempo de cada actividad para cada periodo. Por ejemplo para el periodo T3, se tiene la incidencia de las tareas B, C y E, por tanto se tiene un esfuerzo de 3 periodos de tiempo.

En la fila de "Esfuerzo acumulado (Tiempo)", se presenta la acumulación de esfuerzo en periodos de tiempo de los valores calculados en la fila "Esfuerzo diario (tiempo)". La sumatoria total de periodos al final en T5 es de 11 periodos de tiempo.

En la fila de "Esfuerzo crítico (Tiempo)", se presenta la sumatoria del esfuerzo medido en periodos de tiempo de cada actividad que se encuentra en ruta crítica para cada periodo. De acuerdo a la Tabla 3-4, las actividades D y E conforman la ruta crítica. Por ejemplo para el periodo T3, se tiene la incidencia de la actividad crítica E, por tanto se tiene un esfuerzo de 1 periodos de tiempo.

En la fila de "Esfuerzo crítico acumulado (Tiempo)", se presenta la acumulación de esfuerzo en periodos de tiempo de los valores calculados en la fila "Esfuerzo crítico (tiempo)". La sumatoria total de periodos al final en T5 es de 5 periodos de tiempo.

Para el criterio del riesgo de sobre costo y/o sobreplazo, se construyó en base al mismo cronograma del ejemplo, una ponderación de riesgos que se presenta en la Tabla 3-5, donde se estiman que las actividades A, B y E están expuestas a riesgos por sobre costo y/o sobreplazo. Se ha ponderado para las actividades A, B y E los valores 0.10, 0.30 y 0.60 respectivamente.

Tabla 3-5: Cronograma con ponderación de riesgos del proyecto ejemplo

Actividad	T1	T2	T3	T4	T5
A	0.10				
B		0.15	0.15		
C		0.00	0.00	0.00	
D	0.00	0.00			
E			0.20	0.20	0.20
Riesgo periodo (ponderado)	0.10	0.15	0.35	0.20	0.20
Riesgo acumulado (ponderado)	0.10	0.25	0.60	0.80	1.00

Calculados estos valores, es posible determinar los valores porcentuales de la línea base del Avance Físico aplicando la Ecuación 2 como se presenta en la Tabla 3-6. Además se utilizan unos valores para este ejemplo de k1, k2, k3 y k4 de 0.30, 0.15, 0.40 y 0.15 respectivamente, entendiendo que estos valores son colocados al azar exclusivamente para demostración de este ejemplo. La forma de evaluar estos coeficientes se detallan en el numeral 3.2.7.

Tabla 3-6: Composición de la Línea Base del avance físico del ejemplo

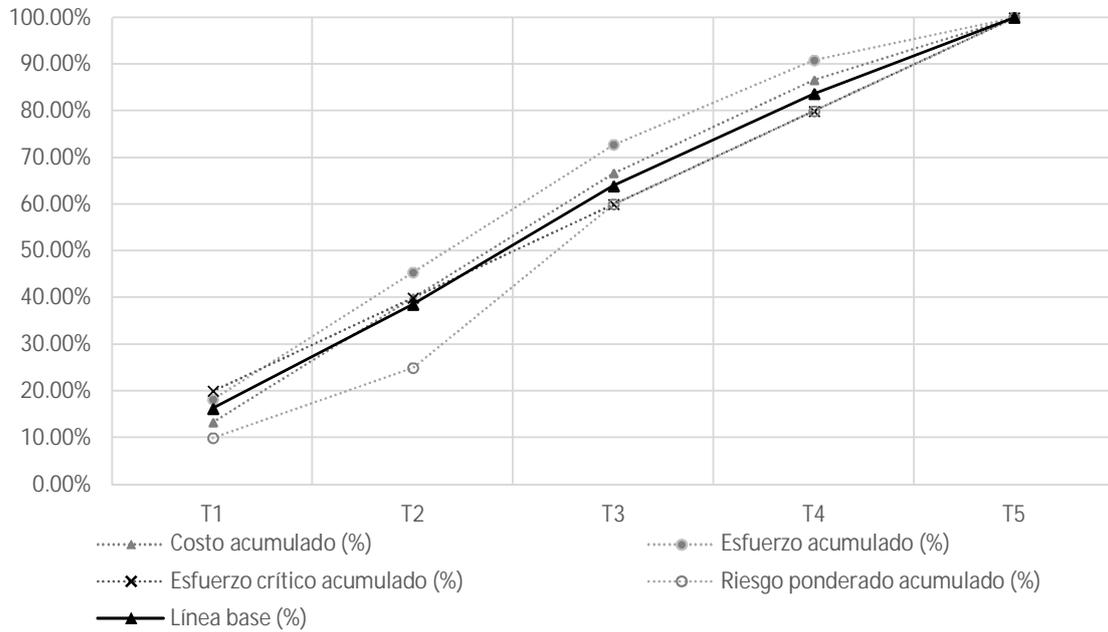
Costo acumulado (%)	13.33%	40.00%	66.67%	86.67%	100.00%
Esfuerzo acumulado (%)	18.18%	45.45%	72.73%	90.91%	100.00%
Esfuerzo crítico acumulado (%)	20.00%	40.00%	60.00%	80.00%	100.00%
Riesgo ponderado acumulado (%)	10.00%	25.00%	60.00%	80.00%	100.00%
Línea base (%)	16.23%	38.57%	63.91%	83.64%	100.00%

Como ejemplo de aplicación de la Ecuación 2 se presenta el cálculo del avance planificado total del proyecto para el periodo T3:

$$\begin{aligned}
 A_{p(T3)} &= 0.30 \times \frac{\$50}{\$75} + 0.15 \times \frac{8 \text{ UTiempo}}{11 \text{ UTiempo}} + 0.40 \times \frac{3 \text{ UTiempo}}{5 \text{ UTiempo}} + 0.15 \times 0.60 \\
 &= 63.91\%
 \end{aligned}$$

Calculados los porcentajes de avance físico programado en función del costo, tiempo y criticidad de cada actividad del cronograma, se construye una curva "S" de la línea base de Avance Físico como se presenta en la Figura 3-3.

Figura 3-3: Construcción de la Línea Base del Avance Físico del ejemplo



b. Aplicación de la línea base del avance presupuestario

Como explicación de la Ecuación 3, y continuando con el ejemplo básico presentado en la Tabla 3-4, se presenta en la Tabla 3-7 la construcción de la Línea Base del avance presupuestario.

Tabla 3-7: Cronograma de costos del proyecto básico de ejemplo

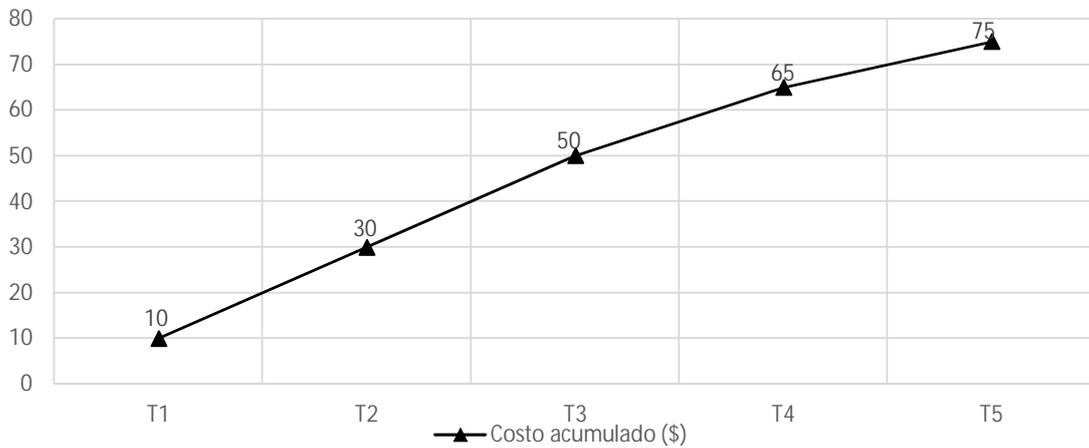
Actividad	T1	T2	T3	T4	T5
A	5				
B		10	5		
C		5	5	5	
D	5	5			
E			10	10	10
Costo por periodo (\$)	10	20	20	15	10
Costo acumulado (\$)	10	30	50	65	75

En la fila de "Costo por periodo (\$)", se presenta la sumatoria del costo programado para todas las actividades que tienen incidencia en cada periodo.

Por ejemplo para el periodo T4, se tiene incidencia económica de las tareas C y E cuya suma sería  $\$5+\$10= \$15$ .

En la fila de "Costo acumulado (\$)", se presenta la acumulación económica diaria de los valores calculados en la fila "Costo por periodo (\$)", teniendo un costo total acumulado en el periodo T5 de \$75. Esta fila representaría la aplicación de la ecuación (4) y se construye una curva "S" de la línea base de avance presupuestario como se presenta en la Figura 3-4.

Figura 3-4: Composición de la Línea Base del Avance Presupuestario del proyecto ejemplo



c. Aplicación de la línea base de la ruta crítica

Como explicación de la Ecuación 4, y continuando con el ejemplo presentado en la Tabla 3-4, se presenta en la Tabla 3-8 la construcción de la Línea Base de la ruta crítica.

Tabla 3-8: Cronograma de proyecto ejemplo para Ruta Crítica

Actividad	T1	T2	T3	T4	T5
A	0				
B		0	0		
C		0	0	0	
D	1	1			
E			1	1	1
Esfuerzo crítico (tiempo)	1	1	1	1	1
Esfuerzo crítico acumulado (tiempo)	1	2	3	4	5
Esfuerzo crítico acumulado (%)	20%	40%	60%	80%	100%

En la fila de “Esfuerzo crítico (Tiempo)”, se presenta la sumatoria del esfuerzo medido en periodos de tiempo de cada actividad que se encuentra en ruta crítica para cada periodo. De acuerdo a la Tabla 3-8, las actividades D y E conforman la ruta crítica. Por ejemplo para el periodo T3, se tiene la incidencia de la actividad crítica E, por tanto se tiene un esfuerzo de 1 periodos de tiempo.

En la fila de “Esfuerzo crítico acumulado (Tiempo)”, se presenta la acumulación de esfuerzo en periodos de tiempo de los valores calculados en la fila “Esfuerzo crítico (tiempo)”. La sumatoria total de periodos al final en T5 es de 5 periodos de tiempo.

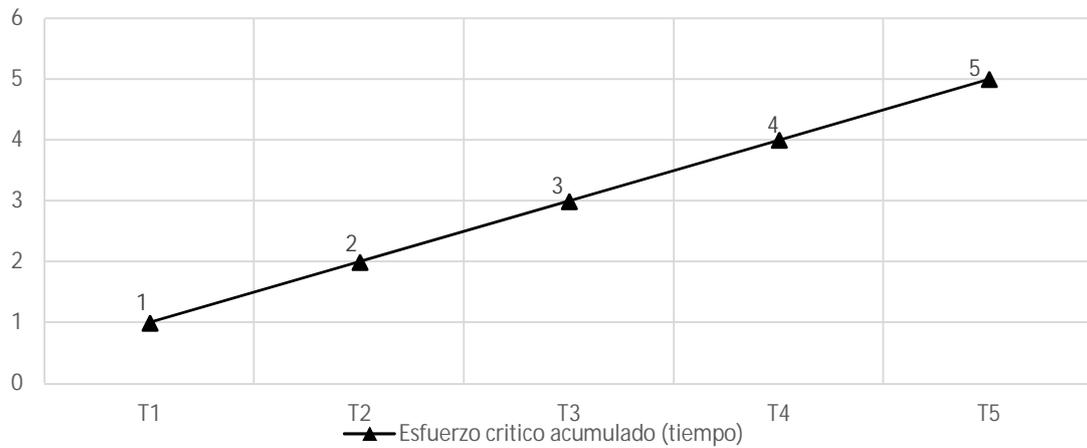
Calculados estos valores, es posible determinar los valores porcentuales de la línea base del avance de las actividades de ruta crítica aplicando la Ecuación 5 como se presenta en la línea “Esfuerzo crítico acumulado (%)” de la Tabla 3-8.

Como ejemplo de aplicación de la Ecuación 5, se presenta el cálculo del avance planificado total del proyecto para el periodo T3:

$$A_{R(T3)} = 100 \times \frac{3}{5} = 60\%$$

Calculados los porcentajes de avance programado de las actividades en ruta crítica en función de la criticidad de cada actividad del cronograma, se construye una curva “S” de la línea base de avance de ruta crítica como se presenta en la Figura 3-5.

Figura 3-5: Composición de la Línea Base del Avance de Ruta Crítica del proyecto ejemplo



d. Aplicación de la medición del avance físico

Como explicación de la Ecuación 6, y continuando con el ejemplo de Tabla 3-4, en la Tabla 3-9 se presenta el cálculo del avance real en términos de costo aplicado a los tres periodos iniciales de evaluación T1, T2 y T3.

Tabla 3-9: Cronograma con el avance real en costos del proyecto ejemplo

Actividad	T1	T2	T3	T4	T5
A	50%	50%			
B		50%	50%		
C		10%	20%		
D	20%	30%	50%		
E			0%		
A	2.5	2.5			
B		5	5		
C		1.5	3		
D	2	3	5		
E			0		
Costo periodo (\$)	4.5	12	13	0	0
Costo acumulado (\$)	4.5	16.5	29.5	0	0

En la fila de "Costo periodo (\$)", se presenta la sumatoria del costo trabajado para todas las actividades que tienen incidencia en cada periodo, y se calcula al multiplicar el costo programado de cada actividad por el porcentaje medido en obra del avance real de cada actividad.

En la fila de "Costo acumulado (\$)", se presenta la acumulación económica diaria de los valores calculados en la fila "Costo diario (\$)", teniendo un costo total acumulado en el periodo T3 de \$29.5.

El cálculo del avance en tiempo de los tres periodos T1, T2 y T3 se presenta en la Tabla 3-10.

Tabla 3-10: Cronograma con el avance real en tiempos del proyecto ejemplo

Actividad	T1	T2	T3	T4	T5
A	50%	50%			
B		50%	50%		
C		10%	20%		
D	20%	30%	50%		
E			0%		
A	0.5	0.5			
B		1	1		
C		0.3	0.6		
D	0.4	0.6	1		
E			0		
Esfuerzo diario (Tiempo)	0.9	2.4	2.6	0	0
Esfuerzo acumulado (Tiempo)	0.9	3.3	5.9	0	0

En la fila de "Esfuerzo diario (Tiempo)", se presenta la sumatoria del esfuerzo medido en periodos de tiempo de cada actividad para cada periodo y multiplicado por porcentaje del avance real medido en obra.

En la fila de "Esfuerzo acumulado (Tiempo)", se presenta la acumulación de esfuerzo en periodos de tiempo de los valores calculados en la fila "Esfuerzo diario

(tiempo)". La sumatoria total de periodos al final en T3 es de 5.9 periodos de tiempo.

El cálculo del avance real de la ruta crítica se presenta en la Tabla 3-11.

Tabla 3-11: Cronograma del proyecto del ejemplo básico

Actividad	T1	T2	T3	T4	T5
A	50%	50%			
B		50%	50%		
C		10%	20%		
D	20%	30%	50%		
E			0%		
A	0	0			
B		0	0		
C		0	0		
D	0.4	0.6	1		
E			0		
Esfuerzo crítico (tiempo)	0.4	0.6	1	0	0
Esfuerzo crítico acumulado (tiempo)	0.4	1	2	0	0

En la fila de "Esfuerzo crítico (Tiempo)", se presenta la sumatoria del esfuerzo medido en periodos de tiempo de cada actividad que se encuentra en ruta crítica para cada periodo y multiplicado por el porcentaje de avance real de la actividad medido en obra.

En la fila de "Esfuerzo crítico acumulado (Tiempo)", se presenta la acumulación de esfuerzo en periodos de tiempo de los valores calculados en la fila "Esfuerzo crítico (tiempo)". La sumatoria total de periodos al final en T3 es de 2 periodos de tiempo.

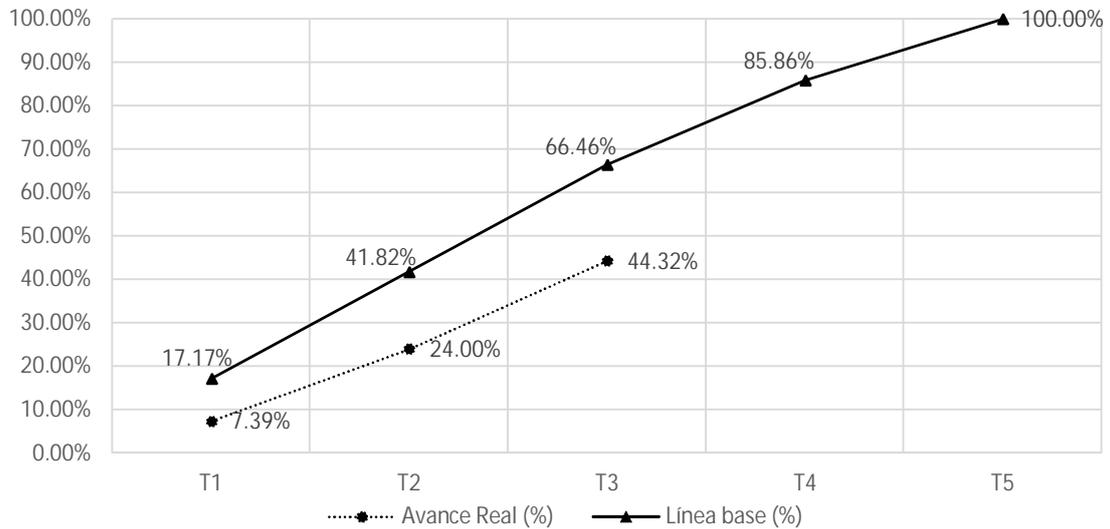
Calculados estos avances reales por separado de costo, tiempo, ruta crítica, y riesgos ponderados por sobre costo y sobreplazo, es posible determinar el Avance real como se muestra en la Tabla 3-12.

Tabla 3-12: Composición del Avance Real en (%) del proyecto ejemplo

Criterio	T1	T2	T3	T4	T5
Avance Costo acumulado (%)	6.00%	22.00%	39.33%	0.00%	0.00%
Avance Esfuerzo acumulado (%)	8.18%	30.00%	53.64%	0.00%	0.00%
Esfuerzo crítico acumulado (%)	8.00%	20.00%	40.00%	0.00%	0.00%
Riesgo acumulado (%)	5.00%	25.00%	40.00%	0.00%	0.00%
<b>Avance Real (%)</b>	<b>6.98%</b>	<b>22.85%</b>	<b>41.85%</b>	<b>0.00%</b>	<b>0.00%</b>

Calculados los porcentajes de avance físico real en función del costo, tiempo y criticidad de cada actividad del cronograma, es posible realizar el seguimiento del proyecto a través de una comparación entre la línea base planificada y el avance real como se presenta en la Figura 3-6.

Figura 3-6: Comparación de la Línea Base Vs el Avance Físico Real del proyecto ejemplo



Del ejemplo presentado, se puede observar en la Figura 3-6 que en los tres primeros periodos de evaluación el proyecto presenta retrasos de avance físico,

en el T3 según la programación de línea base el proyecto debió tener un avance físico de 66.46%, sin embargo presenta un avance real de apenas 44.32%.

e. Aplicación de la medición del avance presupuestario

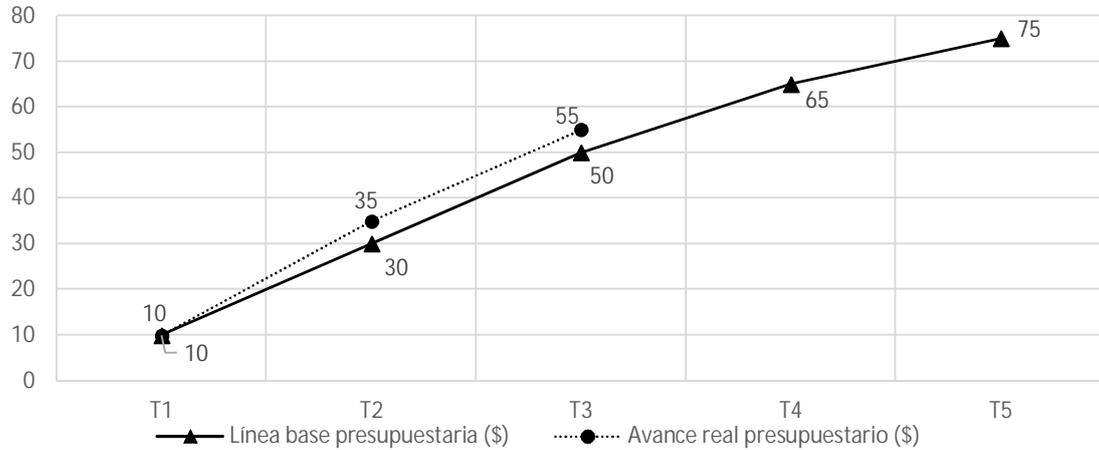
Como explicación de la Ecuación 6, y continuando con el ejemplo presentado en la Tabla 3-4, se presenta en la Tabla 3-13 la construcción del avance presupuestario.

Tabla 3-13: Costos reales ejecutados del proyecto del ejemplo básico

Actividad	T1	T2	T3	T4	T5
A	5	5			
B		5	10		
C		10	5		
D	5	5	5		
E					
Costo real periodo (\$)	10	25	20	0	0
Costo real acumulado (\$)	10	35	55	0	0

Calculados los costos reales acumulados de las actividad del cronograma para los tres periodos de evaluación T1, T2 y T3, es posible realizar el seguimiento presupuestario del proyecto a través de una comparación entre la línea base presupuestaria y el avance presupuestario real como se presenta en la Figura 3-7.

Figura 3-7: Comparación de la Línea Base Presupuestario comparado con el Avance Presupuestario Real del proyecto-ejemplo



Del ejemplo presentado, se puede observar en la Figura 3-7 que en los tres primeros periodos de evaluación el proyecto presenta gastos superiores a los planificados, en el periodo T3, según la programación de la línea base, el proyecto debió presentar un gasto de \$50, sin embargo presentó un gasto real superior de \$55.

f. Aplicación de la medición del avance de la ruta crítica

Como explicación de la Ecuación 7, y continuando con el ejemplo presentado en la Tabla 3-4, se presentó en la Figura 3-5 la construcción del avance de ruta crítica, de donde al aplicar la Ecuación 7 se presenta el avance real de ruta crítica en la Tabla 3-14.

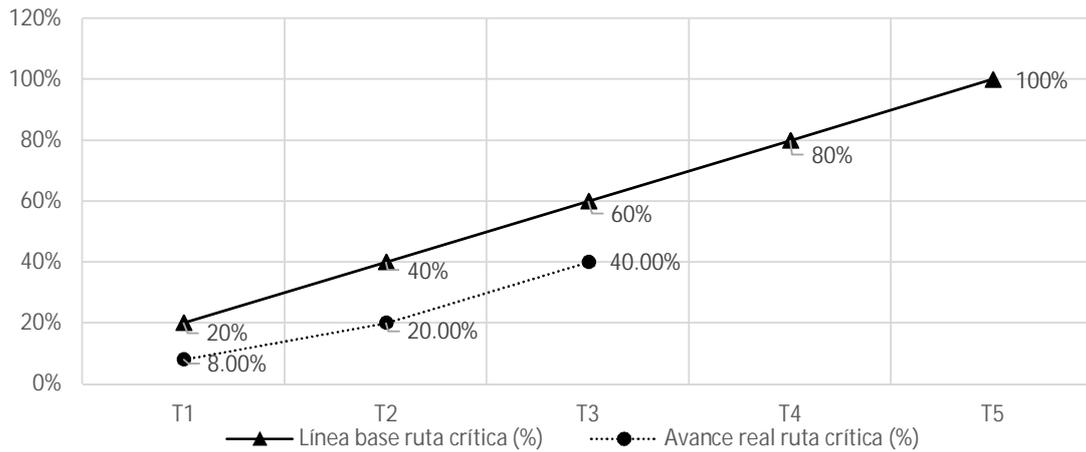
Tabla 3-14: Avance real de ruta crítica del proyecto del ejemplo básico

Esfuerzo crítico acumulado (%)	8.00%	20.00%	40.00%	0.00%	0.00%
Avance Real de Ruta Crítica (%)	8.00%	20.00%	40.00%	0.00%	0.00%

Calculado el avance real de ruta crítica de las actividad del cronograma para los tres periodos de evaluación T1, T2 y T3, es posible realizar el seguimiento del

proyecto a través de una comparación entre la línea base de ruta crítica y el avance real de ruta crítica como se presenta en la Figura 3-8.

Figura 3-8: Comparación de la Línea Base Presupuestario comparado con el Avance Presupuestario Real del proyecto-ejemplo



Del ejemplo presentado, se puede observar en la Figura 3-8 que en los tres primeros periodos de evaluación el proyecto presenta retrasos en los plazos de la ruta crítica, en el periodo T3, según la programación de la línea base, el proyecto debió presentar un avance en ruta crítica del 60%, sin embargo presentó un avance real en ruta crítica del 40%.

g. Aplicación de la proyección del costo

Como explicación de la Ecuación 8, y en continuación del ejemplo básico, en la Tabla 3-15 se presenta los avances reales en obra medidos en porcentaje y los costos planificados.

Tabla 3-15: Avance real indicado en porcentaje y costos planificados del ejemplo básico

Actividad	T1	T2	T3	T4	T5
A	50%	50%			
B		50%	50%		
C		10%	20%		
D	20%	30%	50%		
E					
A	5				
B		10	5		
C		5	5	5	
D	5	5			
E			10	10	10

Se calcula el Valor Ganado EV, multiplicando el porcentaje de avance de la Tabla 3-15 por el monto planificado total de cada actividad. Lo indicado se presenta en la Tabla 3-16, por ejemplo, para el periodo T2 y la actividad B, se consigue multiplicando el 50% por el costo total de la actividad que corresponde a US\$ 15, teniendo el resultado de US\$ 7.5. Finalmente, el EV se calcula con la sumatoria acumulada de los valores resultantes.

Tabla 3-16: Cálculo del EV para el ejemplo básico

Actividad	T1	T2	T3	T4	T5
A	2.5	2.5			
B		7.5	7.5		
C		1.5	3		
D	2	3	5		
E					
Total (\$)	4.5	14.5	15.5		
EV (\$)	4.5	19	34.5		

Obtenido el Valor Ganado EV, se prepara la información necesaria para aplicar la Ecuación 8. Estos indicadores se presentan en la Tabla 3-17 el valor de CPI se calcula dividiendo EV para AC, por ejemplo en el periodo T2, al dividir 19/35 se obtiene 0.54.

Tabla 3-17: Cálculo de la proyección del costo a la conclusión del proyecto para el ejemplo básico

Indicador	T1	T2	T3	T4	T5
AC	10	35	55		
EV	4.5	19	34.5		
CPI	0.45	0.54	0.63		
BAC	75	75	75		
Proyección Costo Conclusión (\$)	166.67	138.89	119.05		

La proyección del costo a la conclusión se consigue al dividir BAC para el CPI, en el periodo T2 del ejemplo se tendría 75/0.54 obteniendo un valor de US\$ 138.89 como proyección a la conclusión del proyecto.

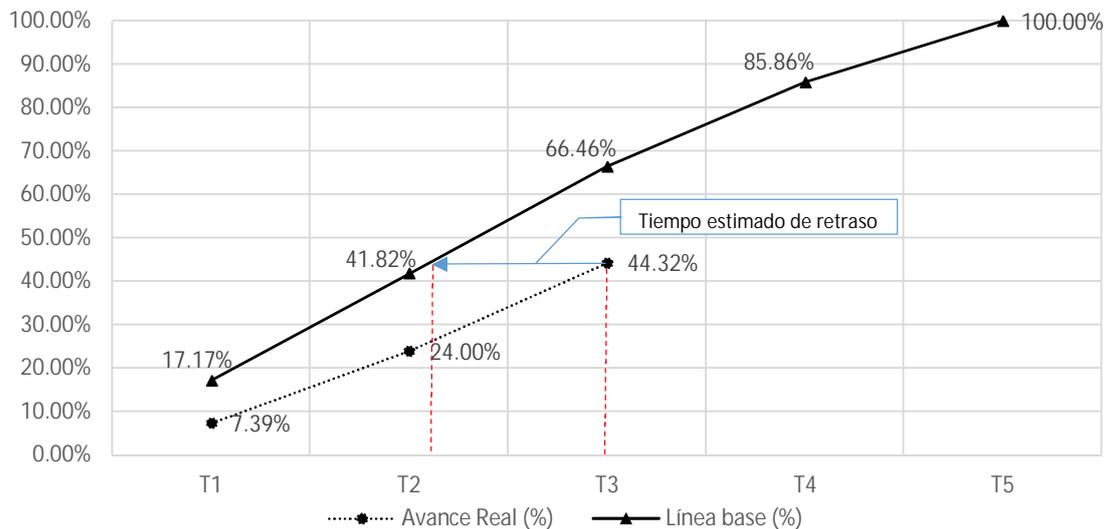
Estos cálculos presentados se resumen en la Ecuación 8, por ejemplo en el periodo T2 se tiene:

$$P_{Costos_{T2}} = 75 \times \frac{35}{19} = 138$$

h. Aplicación de la proyección del tiempo

Para la aplicación de la Ecuación 9, se continúa con el ejemplo básico desarrollado en este apartado. Basados en la Figura 3-6, se realiza la proyección del avance físico real en el periodo T3 hasta la curva "S" de la línea base del avance físico. El valor que toma la proyección en unidades de tiempo es la proyección del tiempo de retraso que lleva el proyecto a la conclusión. Lo dicho se presenta en la Figura 3-9.

Figura 3-9: Proyección de tiempo estimado de retraso en el ejemplo básico



Para aplicar la Ecuación 9, es necesario calcular los valores  $T_P$  y  $T_A$ , que para el caso del ejemplo tenemos,  $T_A$  igual al periodo 3, que si estaríamos trabajando en meses sería en el mes 3, mientras que para el  $T_P$  de manera estimativa se tiene un valor de 2.05 meses. Por tanto al aplicar la Ecuación 9 se tiene:

$$P_{Tiempo_{T3}} = 3 - 2.05 = 0.95 \text{ meses de retraso}$$

### 3.3 Métodos de comprobación

En el numeral 3.2 de este capítulo, se desarrolló la metodología CTCR para el seguimiento y control de proyectos complejos de construcción. En este apartado se aborda el método de comprobación y verificación de la bondad de la metodología CTCR al aplicarla a proyectos complejos de construcción.

El método que se plantea esta Tesis Doctoral, para comprobar la aplicabilidad, consistencia y eficiencia de la metodología de seguimiento y control de proyectos complejos de construcción, es a través de la construcción de modelos estocásticos de simulación de cronogramas que involucren los plazos, los costos, la ruta crítica y sus riesgos aplicado a cuatro proyecto hidroeléctricos reales ubicados en la República del Ecuador.

Estos modelos generan múltiples escenarios, aplicando a cada escenario la metodología CTCR, teniendo al final una base de datos de resultados que permitan, a través de herramientas estadísticas, comprobar el ajuste y potencia de la metodología. De manera adicional, en cada escenario se aplica la técnica EVM para comparar las eficiencias con CTCR.

#### 3.3.1 Modelo de simulación

Una simulación calcula numerosos escenarios de un modelo repitiendo valores obtenidos de una distribución aleatoria de probabilidad para variables inciertas y utilizando estos valores para calcular nuevos datos. Cada escenario produce resultados según los datos que se asocian por la pura suerte de la aleatoriedad y por tanto cada escenario ofrece o puede ofrecer una predicción. Estas predicciones son hechos, con fórmulas o funciones, que se definen como datos de salida del modelo.

Un experimento de muestreo permite simular en una hoja de cálculo lo que ocurriría en la realidad, sin tener que efectuar innumerables pruebas. El resultado del muestreo debe ser lo suficientemente representativo de lo que ocurriría en la realidad si se dieran esas variables de entrada con sus probabilidades asociadas.

El tipo de distribución que gobiernan las probabilidades depende de las condiciones que rodeen a las variables. Durante la simulación el valor para utilizar cada variable se selecciona de forma aleatoria del conjunto de posibilidades que existen. Para obtener buenos resultados, la realidad debe estar bien representada.

a. Concepto de simulación

A continuación se desarrolla los conceptos de “simulación” investigados:

Según Cabeza y Torra [72], “La simulación es un método analítico que intenta imitar la realidad cuando otros análisis son matemáticamente muy complejos o muy difíciles de reproducir. Es un proceso cuantitativo que, mediante un modelo que describe o se aproxima a la realidad, realiza una serie de experimentos, tanteos o pruebas organizadas para predecir el comportamiento futuro de las variables que se desea investigar.”

Según Fullana y Urquía [73] “La teoría de la simulación podría definirse como un medio que experimenta con un modelo detallado de un sistema real para determinar cómo responderá el sistema a los cambios en su estructura o entorno”.

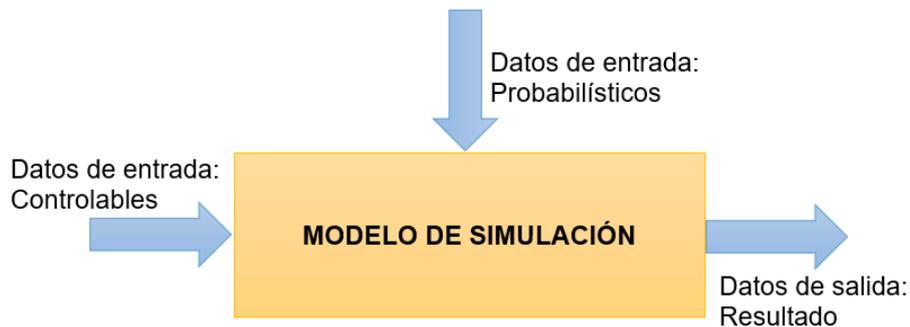
De acuerdo a González Dan [74], “La simulación es una técnica cuantitativa utilizada para obtener la respuesta más probable de un evento por medio de la simulación de un modelo matemático. Una simulación se puede definir como el proceso de diseñar y desarrollar un modelo computarizado de un sistema o proceso y conducir experimentos con este modelo con el propósito de entender el comportamiento del sistema o evaluar varias estrategias con las cuales se puede operar el sistema.”

La simulación, como método o como proceso, se concreta en la elaboración de un “modelo de simulación” que puede ser tan amplio o variado como sea la realidad a investigar.

De acuerdo a Cabeza y Torra [72], “un modelo de simulación es un sistema de ecuaciones matemáticas, lógicas y datos que describen las relaciones entre variables operativas y financieras.”

Un modelo de simulación describe una o unas variables de salida en base a datos y variables de entrada que son sometidos a relaciones lógicas y expresiones matemáticas. Un modelo de simulación tiene como datos de entrada, datos controlables y probabilísticos como se muestra en la Figura 3-10 [75].

Figura 3-10: Diagrama de un modelo de simulación



Fuente: adecuado por el autor de [75]

b. Simulación Monte Carlo

El método matemático fue llamado “Monte Carlo” en honor a Mónaco, considerado como la capital del juego de azar por sus casinos. El desarrollo sistemático de este método se basó en el trabajo de Harris y Herman Kahn en 1948. El uso real de los métodos de Monte Carlo como una herramienta de investigación, proviene del trabajo de la bomba atómica durante la Segunda Guerra Mundial [74].

El método de Monte Carlo es un procedimiento numérico que permite aproximar la resolución de expresiones matemáticas complejas para encontrar resultados exactos [76].

La simulación de Monte Carlo utiliza funciones de distribución con el propósito de realizar una experimentación cuyos resultados simulen lo que pasaría en un sistema real. Esta herramienta combina conceptos estadísticos con la capacidad de programas computacionales capaces de generar números aleatorios y automatizar cálculos [74].

Generalmente en estadística los modelos aleatorios se usan para simular fenómenos que poseen algún componente aleatorio. Pero en el método Monte Carlo, por otro lado, el objeto de la investigación es el objeto en sí mismo, un suceso aleatorio o pseudo-aleatorio se usa para estudiar el modelo

### 3.3.2 El Método de comprobación

El método utilizado para comprobar la eficiencia y potencia de la metodología CTCR de seguimiento y control de proyectos complejos de construcción, se basa en modelos estocásticos utilizando planificaciones y cronogramas de proyectos complejos de construcción reales. Para esta Tesis Doctoral se han tomado cuatro casos de estudios dentro del sector hidroenergético en la República del Ecuador, y que se desarrollan con detalle en el Capítulo 4.

Las condiciones principales que los modelos deben cumplir, en cada caso de estudio, son:

- La estructura de desglose de trabajo, la programación de las actividades, los costos asignados a cada actividad, y los plazos establecidos para cada actividad, serán acordes a una estructura y condiciones de una central hidroeléctrica de capacidad promedio en el Ecuador.

- Si bien un proyecto hidroeléctrico presenta condiciones absolutamente particulares desde el punto de vista técnico y geográfico. Se revisarán los componentes principales de los proyectos hidroeléctricos en catálogo en el Ecuador para proponer una estructura de desglose de trabajo acorde a la realidad de los proyectos hidroeléctricos que están en lista de construcción en el Ecuador.
- Las entradas, como variables aleatorias de los modelos, serán los costos y el tiempo para cada actividad de la estructura de desglose de trabajo.
- La aleatoriedad de las variables de entrada se plantearán a través de funciones de distribución tipo Pert. Los valores optimistas, más probables y pesimistas de las distribuciones serán planteados por especialistas con experiencia en construcción de proyectos hidroeléctricos en el Ecuador.
- Las salidas principales del modelo serán las proyecciones de los costos y de los tiempos totales del proyecto evaluados periódicamente mientras se ejecuta el proyecto hasta su culminación.
- A través del método de Monte Carlo, se simularán múltiples escenarios que permitirá generar una base de datos del comportamiento del proyecto durante su ejecución en función del costo y del tiempo planificado y realmente ejecutado.
- Sobre la base de datos generada por el modelo, se aplicarán herramientas y métodos estadísticos que permitirán probar las hipótesis, la bondad y potencia de la metodología de seguimiento y control planteada.

Para verificar la eficiencia de las metodologías CTCR y EVM como técnicas para la estimación del avance físico- financiero y de pronóstico del costo y de la duración, se calcularon y compararon indicadores propios de estas técnicas dentro de las simulaciones de los modelos. Los resultados se presentan en el Capítulo 4.

### 3.3.3 Estructura de los modelos de simulación

Para cada caso de estudio se estructuró el modelo exactamente con los mismos componentes siguientes:

- Programación, donde se generan actividades principales, estructura de desglose de trabajo, fechas planificadas de ejecución, etc.
- Cronograma con desglose de costos, donde a cada actividad que conforma la planificación se sustenta con un costo.
- Cronograma con desglose de plazos, donde a cada actividad se vincula un plazo y que al final se tendrá un plazo total del proyecto.
- Cronograma con desglose de tiempos de las actividades que conforman la Ruta Crítica.

A continuación se desarrollan cada una de estas etapas de la estructuración.

#### a. Programación

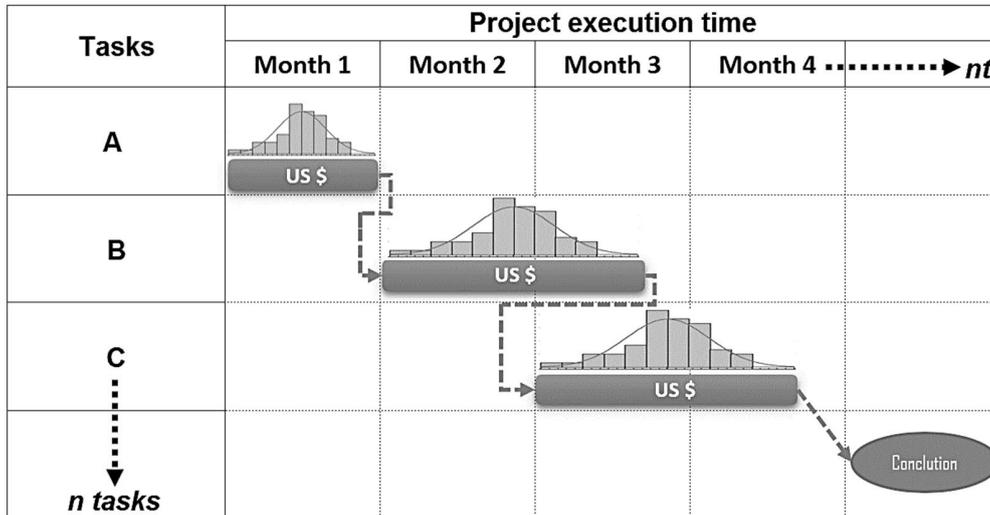
En la etapa de planificación de un proyecto complejo de construcción, es necesario desarrollar la programación del proyecto. Resultado de la programación es un plan detallado donde se representa la forma y el momento en el que el proyecto de construcción irá concluyendo sus infraestructuras

definidas en el alcance. El resultado principal de una programación, es el cronograma del proyecto, que es la herramienta principal para gestionar el estado de avance del proyecto.

Los principales datos requeridos para el desarrollo de la programación de un proyecto son: actividades, estructura de desglose de trabajo, fechas planificadas, duraciones, recursos, dependencias y restricciones.

Los cronogramas se conforman por una distribución de tareas interrelacionadas, donde a cada una de estas tareas se asigna un rango probable de costo y de duración. La Figura 3-11 presenta muestra gráficamente esta idea. La relación de dependencia entre las tareas y su asignación de costo y duración se realizan con las técnicas tradicionalmente empleadas: Program Evaluation and Review Technique (PERT) y Critical Path Method (CPM). El CPM permite encontrar la duración total del proyecto conociendo las duraciones de las actividades, mientras que el PERT permite incorporar incertidumbre en estas duraciones [77] [78].

Figura 3-11: Esquema de cronograma con variabilidad en duración y costo



Para el caso de estudio del proyecto hidroeléctrico Cardenillo se desprenden las siguientes características del proyecto:

- Se encuentra a nivel de estudios y diseños definitivos concluidos.
- Cardenillo tiene prioridad de construcción para el gobierno del Ecuador en mediano plazo.
- Los estudios y diseños de Cardenillo contienen un cronograma elaborado por un equipo de especialistas en diseños de centrales hidroeléctricas.
- Cardenillo está constituido por: presa, túnel de conducción, casa de máquinas subterránea, túnel de descarga.
- La capacidad de generación del diseño de Cardenillo es la segunda más grande del país por ser construida con 595.65 MW de potencia.

Se trabajaron con 36 actividades resumen distribuidas en 5 componentes como se presenta en la Tabla 3-18.

Tabla 3-18: Actividades resumen de la estructura de desglose de trabajo del proyecto hidroeléctrico Cardenillo

1	Vías de acceso al proyecto	3	Túnel de carga
1.1	Vía de Acceso a la Presa	3.1	Túnel Ventana No. 1
1.2	Puente Qda San José	3.2	Bocatoma - Excavación, sostenimiento
1.3	Túnel de acceso a Descarga de Túnel de desvío	3.3	Túnel de Carga: Ventana N. 1 a Bocatoma
1.4	Túnel de acceso Intermedio	3.4	Montaje compuerta Túnel de Carga
1.5	Vía de acceso El Carmen - Casa de Máquinas	3.5	Túnel de Carga Ventana No. 2
1.6	Puente definitivo sobre el Río Paute	3.6	Chimenea de Equilibrio
1.7	Vía de Acceso a la Ventana 2 del Túnel de Carga	3.7	Tubería de presión y Distribuidor
1.8	Vías de Acceso a la Estructura de Descarga	4	Casa de máquinas subterránea
2	Presa de arco doble curvatura	4.1	Plataforma y Portal de Túnel Casa de Maquinas
2.1	Túnel de desvío - Excavación y sostenimiento	4.2	Túnel de Acceso: Casa de Maquinas
2.2	Ataguía aguas arriba	4.3	Casa de Maquinas - Excavaciones y sostenimiento
2.3	Ataguía aguas abajo y puente de acceso	4.4	Casa de Maquinas - Hormigones
2.4	Excavaciones estribos Presa	4.5	Montaje - Equipo Mecánico en Casa de Maquinas
2.5	Hormigón Estructura Presa	4.6	Casa de Transformadores
2.6	Montaje Equipos Hidromecánicos de la Presa	4.7	Galerías de Barras y Cables
2.7	Llenado del embalse	4.8	Subestación y Obras Anexas
		4.9	Colector y Túnel de Descarga
		4.10	Equipo hidromecánico Fabricación
		4.11	Equipo hidromecánico Transporte
		4.12	Equipo eléctrico Fabricación y transporte
		4.13	Montaje - Equipamiento Eléctrico y de Control

4.14 Pruebas y Puesta en marcha

---

5 Ejecución de Plan de Manejo Ambiental

---

Fuente: Estudios y diseños de los proyectos hidroeléctricos

Con el grupo de actividades presentado en la Tabla 3-18, se construyó un diagrama de barra que representa el cronograma de la planificación del proyecto. Las actividades fueron dispuestas en el tiempo según su interdependencia, hasta conseguir un cronograma con 36 actividades distribuidas en 75 meses, como se presenta en la Figura 3-12. Además se han determinado diez actividades que se encuentran en ruta crítica.

Los tiempos establecidos para cada actividad, así como su interdependencia, fueron analizados y trabajados por un equipo especializado de técnicos que tuvieron a su cargo los estudios y diseños del proyecto Cardenillo [79].

Figura 3-12: Cronograma resumen del proyecto hidroeléctrico Cardenillo

ID	ACTIVIDAD	Duración (meses)	Costo (USD millones)	duración en periodos mensuales
2	Vía de Acceso a la Presa	4	6	
3	Puente Oda San José	1	2	
4	Túnel de acceso a Descarga de Túnel de desvío	9	18	
5	Túnel de acceso Intermedio	1	10	
6	Vía de acceso El Carmen - Casa de Máquinas	8	10	
7	Puente definitivo sobre el Río Paute	2	2	
8	Vía de Acceso a la Ventana 2 del Túnel de Carga	7	4	
9	Vías de Acceso a la Estructura de Descarga	9	2	
10	Túnel de desvío - Excavación y sostenimiento	7	10	
11	Ataguía aguas arriba	4	1	
12	Ataguía aguas abajo y puente de acceso	4	2.7	
13	Excavaciones estribos Presa	14	29.2	
14	Hormigón Estructura Presa	27	95.1	
15	Montaje Equipos Hidromecánicos de la Presa	11	5	
16	Llenado del embalse	3	1	
17	Tunel Ventana No. 1	8	5	
18	Bocatoma - Excavación, sostenimiento	5	4	
19	Túnel de Carga: Ventana N. 1 a Bocatoma	15	20	
20	Montaje compuerta Túnel de Carga	6	2	
21	Túnel de Carga Ventana No. 2	33	61.8	
22	Chimenea de Equilibrio	30	5.8	
23	Tubería de presión y Distribuidor	33	12.4	
24	Plataforma y Portal de Túnel Casa de Maquinas	3	1.9	
25	Túnel de Acceso: Casa de Maquinas	9	10.7	
26	Casa de Maquinas - Excavaciones y sostenimiento	9	40.4	
27	Casa de Maquinas - Hormigones	12	6	
28	Montaje - Equipo Mecánico en Casa de Maquinas	18	15	
29	Casa de Transformadores	12	7	
30	Galerías de Barras y Cables	18	2.3	
31	Subestación y Obras Anexas	14	11.2	
32	Colector y Túnel de Descarga	54	97.7	
33	Equipo hidromecánico Fabricación	21	68	
34	Equipo hidromecánico Transporte	5	2	
35	Equipo eléctrico Fabricación y transporte	33	400	
36	Montaje - Equipamiento Eléctrico y de Control	23	14	
37	Pruebas y Puesta en marcha	4	2	
38	Ejecución de Plan de Manejo Ambiental	71	8.4	

Para el caso de estudio del proyecto hidroeléctrico Mazar Dudas se desprenden las siguientes características del proyecto:

- Se encuentra construido y en funcionamiento.
- Los estudios y diseños de Mazar Dudas contienen un cronograma elaborado por un equipo de especialistas en diseños de centrales hidroeléctricas.

- Mazar Dudas está constituido por: obras de toma de paso, tuberías y túneles de conducción, casa de máquinas exterior, túnel de descarga.
- La capacidad de generación del diseño de Mazar Dudas es de 21 MW de potencia.

Se trabajaron con 29 actividades resumen distribuidas en 4 componentes como se presenta en la Tabla 3-19.

Tabla 3-19: Actividades resumen de la estructura de desglose de trabajo del proyecto hidroeléctrico Mazar Dudas

<u>1. Vías de acceso</u>	<u>2.13 Tanque de carga S Antonio</u>
1.1 Vías de acceso Alazán	2.14 Tubería de presión S Antonio
1.2 Vías de acceso S Antonio	2.15 Casa de Máquinas S Antonio
<u>1.3 Vías de acceso Dudas</u>	2.16 Captación Dudas
<u>2. Obras de generación</u>	2.17 Conducción Dudas
2.1 Captación Alazán	2.18 Tanque de carga Dudas
2.2 Tanque de carga Alazán	2.19 Tubería de presión Dudas
2.3 Casa de Máquinas Alazán	<u>2.20 Casa de Máquinas Dudas</u>
2.4 Sifones en Alazán	<u>3. Equipamiento electromecánico</u>
2.5 Túneles en conducción Alazán	3.1 Construcción de equipamiento electromecánico
2.6 Tubería de presión Alazán	3.2 Montaje equipamiento Alazán
2.7 Tubería enterrada conducción Alazán	3.3 Montaje equipamiento San Antonio
2.8 Captación S Antonio	<u>3.4 Montaje equipamiento Dudas</u>
2.9 Descarga S Antonio	<u>4. Obras de transmisión</u>
2.10 Túneles en conducción S Antonio	4.1 Subestación Colectora
2.11 Tubería enterrada conducción S Antonio	<u>4.2 Línea de transmisión</u>
<u>2.12 Acueductos S Antonio</u>	

Con el grupo de actividades presentado en la Tabla 3-19, se construyó un diagrama de barra que representa el cronograma de la planificación del proyecto Mazar Dudas. Las actividades fueron dispuestas en el tiempo según su

interdependencia, hasta conseguir un cronograma con 29 actividades distribuidas en 27 meses, como se presenta en la Figura 3-13.

Figura 3-13: Cronograma resumen del proyecto hidroeléctrico Mazar Dudas

ID	ACTIVIDAD	Duración (meses)	Costo (USD millones)	duración en periodos mensuales
2	Vías de acceso Alazan	4	0.37	[Bar chart showing duration over 27 months]
3	Captación Alazán	16	0.98	[Bar chart showing duration over 27 months]
4	Tanque de carga Alazán	15	1.11	[Bar chart showing duration over 27 months]
5	Casa de Máquinas Alazán	12	1.31	[Bar chart showing duration over 27 months]
6	Sifones en Alazán	16	0.5	[Bar chart showing duration over 27 months]
7	Tuneles en conducción Alazán	21	1.44	[Bar chart showing duration over 27 months]
8	Tubería de presión Alazán	11	0.95	[Bar chart showing duration over 27 months]
9	Tubería enterrada conducción Alazán	21	1.35	[Bar chart showing duration over 27 months]
10	Vías de acceso S Antonio	6	1.79	[Bar chart showing duration over 27 months]
11	Captación S Antonio	7	1	[Bar chart showing duration over 27 months]
12	Descarga S Antonio	8	0.76	[Bar chart showing duration over 27 months]
13	Tuneles en conducción S Antonio	15	0.66	[Bar chart showing duration over 27 months]
14	Tubería enterrada conducción S Antonio	22	2.29	[Bar chart showing duration over 27 months]
15	Acueductos S Antonio	19	3.63	[Bar chart showing duration over 27 months]
16	Tanque de carga S Antonio	11	0.27	[Bar chart showing duration over 27 months]
17	Tubería de presión S Antonio	10	0.94	[Bar chart showing duration over 27 months]
18	Casa de Máquinas S Antonio	14	2.53	[Bar chart showing duration over 27 months]
19	Vías de acceso Dudas	11	2.89	[Bar chart showing duration over 27 months]
20	Captación Dudas	7	1.12	[Bar chart showing duration over 27 months]
21	Conducción Dudas	25	5.65	[Bar chart showing duration over 27 months]
22	Tanque de carga Dudas	7	0.2	[Bar chart showing duration over 27 months]
23	Tubería de presión Dudas	7	1.12	[Bar chart showing duration over 27 months]
24	Casa de Máquinas Dudas	12	2.89	[Bar chart showing duration over 27 months]
25	Subestación Colectora	7	0.45	[Bar chart showing duration over 27 months]
26	Línea de transmisión	9	3.49	[Bar chart showing duration over 27 months]
27	Instalación de equipamiento electromecánico	23	16.61	[Bar chart showing duration over 27 months]
28	Montaje equipamiento Alazán	4	0.09	[Bar chart showing duration over 27 months]
29	Montaje equipamiento San Antonio	4	0.09	[Bar chart showing duration over 27 months]
30	Montaje equipamiento Dudas	4	0.07	[Bar chart showing duration over 27 months]

Para el caso de estudio del proyecto hidroeléctrico Sopladora se desprenden las siguientes características del proyecto:

- Se encuentra construido y en funcionamiento.
- Los estudios y diseños de Sopladora contienen un cronograma elaborado por un equipo de especialistas en diseños de centrales hidroeléctricas.
- Sopladora está constituido por: obras de toma, túneles de conducción, cámara de interconexión, casa de máquinas en caverna, tubería de presión.
- La capacidad de generación del diseño de Sopladora es de 487 MW de potencia.

Se trabajaron con 29 actividades resumen distribuidas en 5 componentes como se presenta en la Tabla 3-20.

Tabla 3-20: Actividades resumen de la estructura de desglose de trabajo del proyecto hidroeléctrico Sopladora

1. Vías de acceso	3. Equipamiento electromecánica
1.1 Vía de acceso al Patio de Maniobras	3.1 Fabricación del Equipamiento
1.2 Construcción de vía Q. Guayaquil - Méndez	3.2 Ejecución de obras provisionales y preparación
2. Obras de generación	3.3 Montaje equipos electromecánicos casa de máquinas
2.1 Túnel de desvío	4. Infraestructura adicional
2.2 Túnel de acceso a cámara de inter. y compuertas	4.1 Construcción de edificio de control
2.3 Túnel de descarga intermedio	4.2 Caverna de transformador
2.4 Cámara de interconexión	4.3 Galería de barras y túnel de paso
2.5 Túnel de interconexión	4.4 Patio de maniobras y Pozo de Cables
2.6 Cámara de compuertas	4.5 Galería de túnel de descarga
2.7 Ventana de túnel de carga	4.6 Túnel de descarga
2.8 Túnel superior de carga	4.7 Cámara de equilibrio de descarga
2.9 Paso subfluvial	4.8 Transición y ramales de descarga al túnel
2.10 Pozo vertical de carga	5. Obras de contención
2.11 Túnel inferior de carga	5.1 Ataguía de desvío de río Paute
2.12 Chimenea de equilibrio	
2.13 Túnel de acceso a casa de maquinas Galerías	
2.14 Excavación y concretos C Maquinas	

Con el grupo de actividades presentado en la Tabla 3-20, se construyó un diagrama de barra que representa el cronograma de la planificación del proyecto Sopladora. Las actividades fueron dispuestas en el tiempo según su

interdependencia, hasta conseguir un cronograma con 29 actividades distribuidas en 47 meses, como se presenta en la Figura 3-14.

Figura 3-14: Cronograma resumen del proyecto hidroeléctrico Sopladora

ID	ACTIVIDAD	Duración (meses)	Costo (USD millones)	duración en periodos mensuales
2	Vía de acceso al Patio de Maniobras	8	20.97	
3	Construcción de vía O. Guayaquil - Méndez	44	92.62	
4	Atagüía de desvío de río Paute	18	5.1	
5	Túnel de desvío	17	27.23	
6	Túnel de acceso a cámara de inter. y compuertas	3	2.81	
7	Túnel de descarga intermedio	4	3.73	
8	Cámara de interconexión	8	4.51	
9	Túnel de interconexión	5	2.46	
10	Cámara de compuertas	10	2.14	
11	Ventana de túnel de carga	7	6.29	
12	Túnel superior de carga	34	60.08	
13	Paso subfluvial	14	26.59	
14	Pozo vertical de carga	19	11	
15	Túnel inferior de carga	25	13.67	
16	Chimenea de equilibrio	31	6.25	
17	Túnel de acceso a casa de máquinas	7	14.36	
18	Galerías	3	10.74	
19	Excavación y concretos C Máquinas	19	27.64	
20	Construcción de edificio de control	4	1.15	
21	Fabricación del Equipamiento	29	218.72	
22	Ejecución de obras provisionales y preparación	3	2.38	
23	Montaje equipos electromecánicos casa de máquinas	18	24.3	
24	Caverna de transformador	19	5.43	
25	Galería de barras y túnel de paso	17	0.66	
26	Patio de maniobras y Pozo de Cables	33	8.01	
27	Galería de túnel de descarga	24	7.47	
28	Túnel de descarga	44	62.1	
29	Cámara de equilibrio de descarga	24	6.3	
30	Transición y ramales de descarga al túnel	13	3.33	

Para el caso de estudio del proyecto hidroeléctrico Santiago se desprenden las siguientes características:

- Se encuentra a nivel de diseños definitivos.
- Los estudios y diseños de Santiago contienen un cronograma elaborado por un equipo de especialistas en diseños de centrales hidroeléctricas.
- Santiago está constituido por: Presa de hormigón, túneles de conducción, casa de máquinas en caverna, tuberías de presión.

- La capacidad de generación del diseño de Sopladora es de 3630 MW de potencia.

Se trabajaron con 29 actividades resumen distribuidas en 5 componentes como se presenta en la Tabla 3-21.

Tabla 3-21: Actividades resumen de la estructura de desglose de trabajo del proyecto hidroeléctrico Santiago

1. Vías de acceso	3. Obras de generación
1.1 Camino de Construcción Obra Desvío	3.1 Obra de Toma
1.2 Camino de construcción a CM	3.2 Portal acceso C Máquinas
2. Obras de contención	3.3 Excavación Túneles C Máquinas
2.1 Portales y túnel crucero	3.4 Excavación bóveda CM
2.2 Túnel 1	3.5 Hormigones Casa Máquinas
2.3 Túnel 2	3.6 Lumbreras de Buses y Cables
2.4 Túnel 3	3.7 Ventilación
2.5 Ataguías	3.8 Galería de Oscilación
2.6 Excavaciones obras de contención	3.9 Galería de Transformadores
2.7 Hormigones de presa	3.10 Tuberías a presión
2.8 Desagües de Fondo Elev. 345 msnm	3.11 Tratamientos de impermeabilización desde tuberías
2.9 Galerías	3.12 Túneles de aspiración
2.10 Obra de Excedencias	3.13 Túnel Desfogue
	4. Equipamiento electromecánico
	4.1 Ingeniería y Fabricación E Electromecánico
	4.2 Montaje
	5. Operación inicial
	5.1 Llenado embalse
	5.2 Pruebas, sincronización y operación

Con el grupo de actividades presentado en la Tabla 3-21, se construyó un diagrama de barra que representa el cronograma de la planificación del proyecto

Santiago. Las actividades fueron dispuestas en el tiempo según su interdependencia, hasta conseguir un cronograma con 29 actividades distribuidas en 68 meses, como se presenta en la Figura 3-15.

Figura 3-15: Cronograma resumen del proyecto hidroeléctrico Santiago

ID	ACTIVIDAD	Duración (meses)	Costo (USD millones)	duración en periodos mensuales
2	Camino de Construcción Obra Desvío	5	12.03	
3	Camino de construcción a CM	7	18.25	
4	Portales y tunel crucero	4	19.96	
5	Túnel 1	5	38.45	
6	Túnel 2	7	49.94	
7	Túnel 3	8	74.91	
8	Ataguías	4	50.9	
9	Excavaciones obras de contención	10	55.66	
10	Hormigones de presa	25	384.4	
11	Desagues de Fondo Elev. 345 msnm	3	34.82	
12	Galerías	19	15.88	
13	Obra de Excedencias	22	136.2	
14	Obra de Toma	41	143.3	
15	Portal acceso C Máquinas	2	0.92	
16	Excavación Túneles C Máquinas	8	12.61	
17	Excavación bóveda CM	5	36.11	
18	Hormigones Casa Máquinas	22	50.53	
19	Lumbreras de Buses y Cables	33	8.63	
20	Ventilación	18	9.43	
21	Galería de Oscilación	45	83.51	
22	Galería de Transformadores	31	23.24	
23	Tuberías a presión	29	109.1	
24	Impermeabilización desde tuberías	5	8.18	
25	Túneles de aspiración	23	54.02	
26	Túnel Desfogue	21	157.7	
27	Instalación y Fabricación E Electromecánico	20	1041	
28	Montaje	43	21.91	
29	Llenado embalse	3	10.96	
30	Pruebas, sincronización y operación	2	21.91	

En los siguientes literales, se continúa con el desarrollo de las etapas de la estructuración, tomando como muestra el modelo del proyecto hidroeléctrico Cardenillo. No se requiere presentar los detalles del resto de casos de estudio, ya que corresponden a una estructuración semejante.





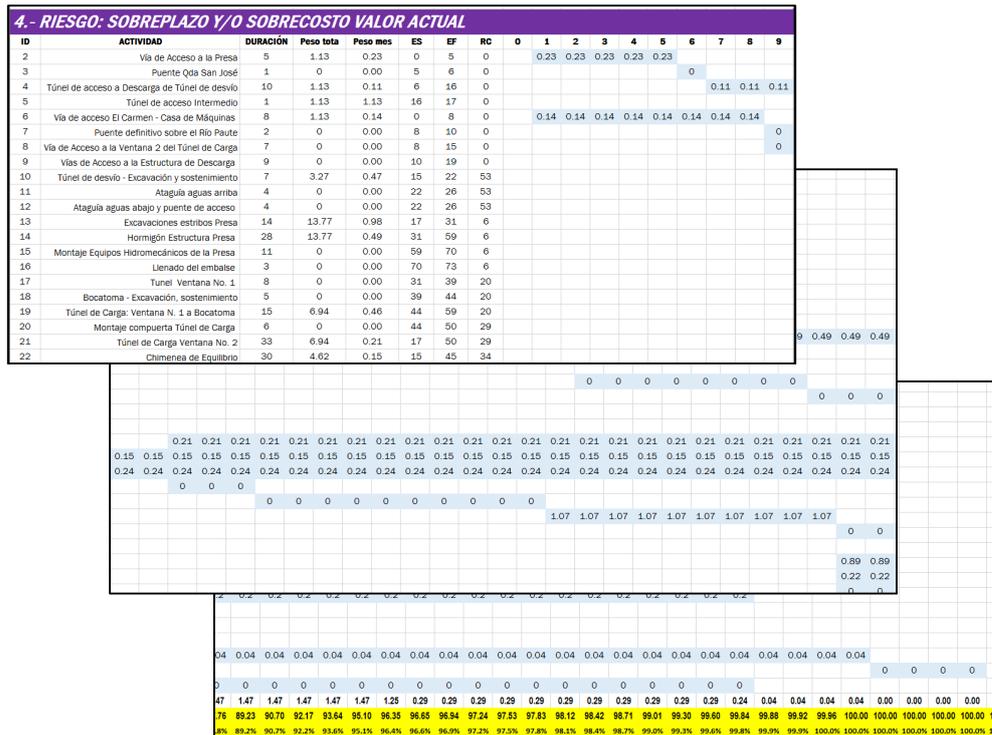


e. Cronograma con desglose de actividades en riesgo

Con el cronograma de barras obtenido en la Figura 3-12, se construyó un cronograma con el desglose y detalle de las actividades en riesgo de generar sobrecosto y/o sobreplazo y con el acumulado total del proyecto calculado de manera periódica. El cronograma se ha trabajado con periodicidad mensual, considerando una ponderación y peso según las actividades de mayor riesgo. Para las actividades que no se encuentran en riesgo se otorga un valor de 0.

En la Figura 3-19 se presenta el cronograma con los pesos de riesgo por sobrecosto y/o sobreplazo para las actividades involucradas. Se otorga un peso a cada actividad y se distribuye para los periodos previstos de ejecución, al final se obtiene un peso total de 100, distribuidos en los 75 meses de plazo planificado de ejecución del proyecto.

Figura 3-19: Cronograma con detalle del tiempo acumulado de actividades en ruta crítica del proyecto hidroeléctrico Cardenillo



La programación queda representada por cuatro cronogramas:

- Cronograma con el desglose de costos
- Cronograma con el desglose de tiempo de todas las actividades
- Cronograma con el desglose de tiempo de actividades en ruta crítica
- Cronograma con el desglose del riesgo por sobrecosto y/o sobreplazo en las actividades

Esta programación se constituye como la línea base del modelo. Estos cronogramas son determinísticos, es decir están ligados a un plazo fijo.

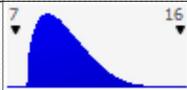
f. Definición de entradas

Para caracterizar la variabilidad del costo y de la duración de cada actividad se utilizaron distribuciones de probabilidad, concretamente la función de distribución PERT. Así se estimaron los valores mínimos, más probables, y máximos, según recomendaciones de la AACE International [80]. En este sentido se aprovechó la experiencia del autor de este trabajo, que cuenta con más de 17 años de experiencia en proyectos de producción de energía hidroeléctrica en la República del Ecuador. La aleatoriedad del costo y de la duración, fue estimada en base a posibles variaciones de cantidades y detalles técnicos de cada especialidad. No se consideraron eventos excepcionales que podrían darse en proyectos de este tipo, como errores en los estudios y diseños de los proyectos, falta de recursos económicos durante la ejecución del proyecto o fenómenos naturales como terremotos, entre otros.

La construcción de estas variables de costo y duración aplicadas a actividades específicas del cronograma, son las variables de entrada de los modelos.

Para el caso del proyecto Cardenillo, se presenta una muestra de las variables de entrada en la Tabla 3-22.

Tabla 3-22: Muestra de la definición de variables de entrada del modelo para las actividades del cronograma del proyecto Cardenillo.

Nombre	Hoja de cálculo	Celda	Gráfico	Mín	Media	Máx
<b>Categoría: Ataguía aguas abajo y puente de acceso</b>						
Ataguía aguas abajo y puente de acceso / [\$US]	Determinístico	K17		2.5	2.9	4.0
Ataguía aguas abajo y puente de acceso / [Meses]	Determinístico	L17		3	4	6
<b>Categoría: Ataguía aguas arriba</b>						
Ataguía aguas arriba / [\$US]	Determinístico	K16		0.9	1.2	2.0
Ataguía aguas arriba / [Meses]	Determinístico	L16		3	4	6
<b>Categoría: Bocatoma - Excavación, sostenimiento</b>						
Bocatoma - Excavación, sostenimiento / [\$US]	Determinístico	K23		3.6	4.1	5.0
Bocatoma - Excavación, sostenimiento / [Meses]	Determinístico	L23		5	5	7
<b>Categoría: Casa de Maquinas - Excavaciones y sostenimiento</b>						
Casa de Maquinas - Excavaciones y sostenimiento / [\$US]	Determinístico	K31		39.0	40.6	43.0
Casa de Maquinas - Excavaciones y sostenimiento / [Meses]	Determinístico	L31		8	10	15
<b>Categoría: Casa de Maquinas - Hormigones</b>						
Casa de Maquinas - Hormigones / [\$US]	Determinístico	K32		5.5	6.0	6.5
Casa de Maquinas - Hormigones / [Meses]	Determinístico	L32		11	12	15

g. Definición de salidas del modelo

Al introducir en los modelos, variables de entrada con rangos posibles de valores, se tienen como resultados variables dependientes, o variables de salida en el modelo, que van a generar que el costo y la duración total de los cronogramas varíen dentro de un rango.

Las variables de salida de los modelos se definen en un rango de respuesta del costo y de la duración o plazo, calculado en diferentes periodos de ejecución del proyecto. Para cada proyecto, según su plazo planificado, se calculan las variables en diversos periodos iniciales y en los últimos diez periodos previos a la conclusión del proyecto. Adicional, se calcula, tanto para la metodología CTCR como para el método EVM. En la Tabla 3-23 se presenta una muestra de las variables de salida definidas para el proyecto Cardenillo.

Tabla 3-23: Muestra de definición de variables de salida en el modelo del proyecto Cardenillo

Nombre	Hoja de cálculo	Celda	Función
Costo Total Simulación	Ejecutado	D42	RiskOutput("Costo Total Simulación")
Días de retraso (EVM) / 10	Indices metodologicos	N31	RiskOutput()
Días de retraso (M.CTCR) / 10	Indices metodologicos	N32	RiskOutput()
Ajuste EVM / 10	Indices metodologicos	N44	RiskOutput()
Ajuste CTCR / 10	Indices metodologicos	N45	RiskOutput()
Días de retraso (EVM) / 20	Indices metodologicos	X31	RiskOutput()
Días de retraso (M.CTCR) / 20	Indices metodologicos	X32	RiskOutput()
Ajuste EVM / 20	Indices metodologicos	X44	RiskOutput()
Ajuste CTCR / 20	Indices metodologicos	X45	RiskOutput()
Días de retraso (EVM) / 30	Indices metodologicos	AH31	RiskOutput()
Días de retraso (M.CTCR) / 30	Indices metodologicos	AH32	RiskOutput()
Ajuste EVM / 30	Indices metodologicos	AH44	RiskOutput()
Ajuste CTCR / 30	Indices metodologicos	AH45	RiskOutput()
Días de retraso (EVM) / 40	Indices metodologicos	AR31	RiskOutput()
Días de retraso (M.CTCR) / 40	Indices metodologicos	AR32	RiskOutput()
Ajuste EVM / 40	Indices metodologicos	AR44	RiskOutput()
Ajuste CTCR / 40	Indices metodologicos	AR45	RiskOutput()
Días de retraso (EVM) / 50	Indices metodologicos	BB31	RiskOutput()
Días de retraso (M.CTCR) / 50	Indices metodologicos	BB32	RiskOutput()
Ajuste EVM / 50	Indices metodologicos	BB44	RiskOutput()
Ajuste CTCR / 50	Indices metodologicos	BB45	RiskOutput()
Días de retraso (EVM) / 60	Indices metodologicos	BL31	RiskOutput()
Días de retraso (M.CTCR) / 60	Indices metodologicos	BL32	RiskOutput()
Ajuste EVM / 60	Indices metodologicos	BL44	RiskOutput()
Ajuste CTCR / 60	Indices metodologicos	BL45	RiskOutput()

Las variables de salida son definidas con los diversos indicadores que forman parte de las metodologías EVM y CTCR, los cuales son calculados en los

diferentes periodos de tiempo hasta la conclusión del proyecto. En la Figura 3-20 se presenta una muestra de los indicadores propios de las metodologías EVM y CTCR calculadas en el modelo del proyecto Cardenillo.

Figura 3-20: Muestra de indicadores de las metodologías EVM y CTCR en el modelo del proyecto Cardenillo

APLICACIÓN DE INDICADORES DE LAS METODOLOGÍAS EVM Y CTCR																								
EVM		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	
	PV	0.0%	0.3%	0.6%	0.9%	1.2%	1.5%	1.8%	2.2%	2.5%	2.9%	3.2%	3.5%	3.8%	4.1%	4.4%	5.5%	7.8%	10.4%	12.8%	15.3%	17.7%	20.2%	
	AC	0.0%	0.3%	0.5%	0.8%	1.0%	1.3%	1.7%	2.0%	2.3%	2.7%	3.0%	3.3%	3.6%	3.9%	4.2%	4.4%	4.9%	6.1%	8.5%	11.0%	13.4%	15.8%	
	EV	0.0%	0.3%	0.5%	0.8%	1.0%	1.3%	1.6%	1.9%	2.3%	2.6%	3.0%	3.2%	3.5%	3.8%	4.1%	4.3%	4.7%	6.0%	8.4%	10.8%	13.2%	15.7%	
	CPI	0.00	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.97	0.97	0.97	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	
	SPI	0.00	0.90	0.90	0.90	0.90	0.87	0.89	0.90	0.90	0.91	0.91	0.91	0.91	0.92	0.92	0.92	0.79	0.60	0.58	0.66	0.71	0.75	0.78
	EAC	995.60	1010.32	1010.32	1010.32	1010.32	1010.32	1012.66	1013.54	1014.16	1016.57	1016.4	1019.6	1020.61	1021.48	1022.24	1022.89	1021.93	1016.78	1011.45	1008.5	1006.54	1005.19	
Earned Schedule	to		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	
	to+1		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
	Pvo		0	0.00289	0.00576	0.00864	0.01152	0.01491	0.01829	0.02167	0.02506	0.02876	0.02876	0.03247	0.03539	0.03832	0.04124	0.04417	0.05513	0.07933	0.10354	0.12774	0.15251	0.17705
	Pvo+1		0.00289	0.00576	0.00864	0.01152	0.01491	0.01829	0.02167	0.02506	0.02876	0.03247	0.03539	0.03832	0.04124	0.04417	0.04710	0.05513	0.07933	0.10354	0.12774	0.15251	0.17705	0.20159
	EVA		0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.03	0.03	0.03	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.05	0.06	0.08	0.11	0.13	0.16
	tA		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	
Método CTCR		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	
	PV	0.0%	0.6%	1.2%	1.8%	2.3%	2.9%	3.5%	4.0%	4.6%	5.4%	6.1%	6.8%	7.6%	8.3%	9.0%	10.2%	12.5%	14.9%	17.2%	19.5%	21.7%	23.8%	
	AC	0.0%	0.6%	1.1%	1.7%	2.3%	2.8%	3.4%	4.0%	4.5%	5.3%	6.0%	6.7%	7.5%	8.2%	8.9%	9.6%	10.6%	12.0%	14.2%	16.4%	18.3%	20.3%	
	VG	0.0%	0.5%	1.0%	1.5%	2.0%	2.6%	3.2%	3.7%	4.1%	4.8%	5.5%	6.2%	6.9%	7.6%	8.4%	9.1%	10.2%	11.6%	13.9%	16.3%	18.4%	20.5%	
	CPI	0.00	0.81	0.84	0.87	0.90	0.93	0.94	0.92	0.92	0.92	0.92	0.93	0.93	0.93	0.94	0.95	0.96	0.95	0.98	0.99	1.00	1.01	
	EAC	995.60	1224.84	1182.33	1142.68	1105.99	1070.84	1058.76	1076.84	1086.44	1087.03	1084.20	1079.33	1072.85	1065.25	1056.87	1047.93	1037.40	1032.27	1014.42	1001.70	992.11	989.05	
Earned Schedule	to		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	14	15	16	17	18	19	
	to+1		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	15	16	17	18	19	20	
	Pvo		0	0.00587	0.01173	0.0176	0.02347	0.02896	0.03469	0.04042	0.04615	0.05364	0.06114	0.06839	0.07563	0.08288	0.09013	0.09013	0.10195	0.12521	0.14956	0.17191	0.19544	0.21954
	Pvo+1		0.00587	0.01173	0.0176	0.02347	0.02896	0.03469	0.04042	0.04615	0.05364	0.06114	0.06839	0.07563	0.08288	0.09013	0.10195	0.10195	0.12521	0.14956	0.17191	0.19544	0.21954	0.24368
	EVA		0.00	0.01	0.01	0.02	0.03	0.03	0.04	0.04	0.05	0.06	0.06	0.07	0.08	0.08	0.09	0.10	0.12	0.14	0.16	0.18	0.20	0.21
	tA		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	

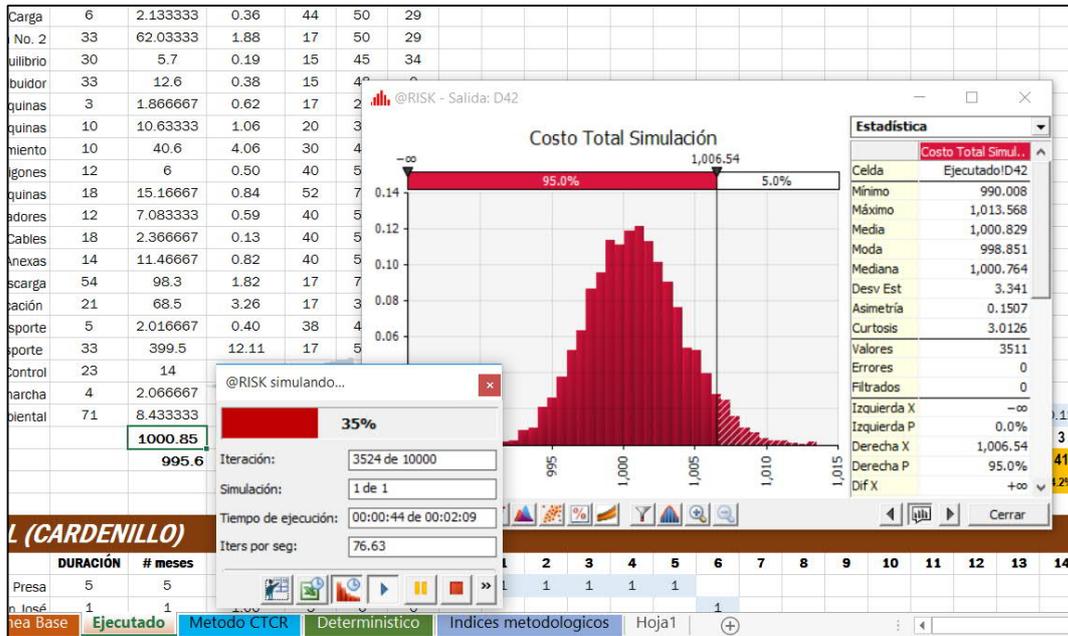
### h. Corrida del modelo

La corrida del modelo consiste en realizar diez mil iteraciones o escenarios de forma aleatoria en base a las variables de entrada, e ir generando a la vez una base de datos con las variables de salida del modelo. Para la simulación de los modelos se utilizaron programas especializados que permiten la aplicación del método de Monte Carlo y la aplicación de la teoría de la probabilidad.

En la Figura 3-21 se presenta una pantalla del momento de la corrida del modelo del proyecto hidroeléctrico Cardenillo. Se puede observar que a medida que el programa avanza con la simulación, se va construyendo histogramas de frecuencia con las variables de salida, permitiendo contar con probabilidades

calculadas de ocurrencia para diferentes condiciones de las variables de entrada, específicamente el costo y el tiempo involucrados en el proyecto.

Figura 3-21: Pantalla de muestra de la corrida del modelo de simulación



### 3.3.4 Software especializado

La base de los modelos se construyeron en Microsoft Excel, y el desarrollo del componente estocástico y de simulación se los realizó con el software especializado @Risk, de la compañía Palisade Corporation [16]. Palisade fue fundada en 1984 y su primer producto fue PRISM, que ofreció a los usuarios de PC la capacidad de cuantificar riesgo mediante la ejecución de simulaciones Monte Carlo. En 1987 fue sucedido por @RISK para Lotus 1-2-3, el primer programa auxiliar de simulación Monte Carlo para hoja de cálculo. En la actualidad, @RISK es un programa auxiliar para Microsoft Excel y Microsoft Project [17].

@RISK realiza análisis de riesgo utilizando la simulación para mostrar múltiples resultados posibles en un modelo de hoja de cálculo, y le indica qué probabilidad hay de que se produzcan. Computa y controla matemática y objetivamente gran número de escenarios futuros posibles, y luego le indica las probabilidades y riesgos asociados con cada uno.

Este software se utiliza para analizar el riesgo y la incertidumbre en una gran variedad de industrias. Desde las áreas financieras hasta las científicas, cualquiera que tenga incertidumbre en sus análisis cuantitativos puede beneficiarse de @RISK.

El software @RISK es compatible con todas las versiones de 32 bits y 64 bits de Microsoft Office 2007 y posteriores, que se ejecutan en Microsoft Windows Vista y versiones posteriores.

Con un número estimado de 150,000 usuarios, el software de Palisade se puede encontrar en más de 100 países y se ha traducido a siete idiomas: inglés, español, portugués, francés, alemán, ruso, japonés y chino. Otras opciones de software con gran experiencia son Cristal Ball de Oracle y Risk Simulator de Real Options Valuation [81] [82].

Dentro de los principales campos donde se ha utilizado este software son:

- Universidades
- Petróleo y Gas
- Seguros/Actuarial

En la Tabla 3-24 se presenta un listado de las principales universidades que son clientes de Palisade.

Tabla 3-24: Lista de Universidades clientes de Palisade

Universidades		
Bryant College	National Institute of Health Science (Japan)	University of Michigan
Cornell University	National Institute of Infectious Disease (Japan)	University of New South Wales (Australia)
George Mason University	New Mexico State University	Universite du Quebec a Rimouski
Georgia Institute of Technology	Ohio State University	University of Texas – Austin
Georgia State University	Panamerican School of Agriculture	University of Tokyo
Harvard College	Penn State University	University of Twente (Netherlands)
Harvard School of Public Health	Texas A&M University	University of Vermont
Hong Kong Polytechnic University	University of Alberta (Canada)	University of Western Ontario – Richard Ivey School of Business
Hyogo Pref. Inst of Pub Health (Japan)	University of California at Berkeley	Virginia Commonwealth University
Indiana State University	University of Canberra (Australia)	Virginia Tech
International Christian University (Japan)	University of Central Florida	University of Wisconsin
Institute of Finance Studies, Barcelona	University of Chicago	
Institute Tecnológico y Estudios Superiores de Monterrey	University Federal de Rio De Janeiro	
Kansas State University	University of Illinois at Urbana-Champaign	
Kochi Medical School (Japan)	University of Marketing and Dist. Sciences (Japan)	
London Business School (The UK)	University of Maryland	
NARO - Division of Upland Farming (Japan)		

Fuente: página oficial de Palisade<sup>2</sup>

Como herramienta de comprobación estadística de los resultados y bases de datos de los modelos, se utilizó el programa Minitab® V18.

Minitab ofrece un conjunto integral de herramientas de análisis estadístico y mejora de procesos. Su empresa desarrolladora cuenta con más de 40 años brindando soporte estadístico a las organizaciones, miles de empresas e instituciones de todo el mundo utilizan Minitab Statistical Software, Companion y Quality Trainer para descubrir defectos en sus procesos y mejorarlos. En 2017, Minitab adquirió Salford Systems, un proveedor líder de soluciones avanzadas de análisis que ofrece un efectivo conjunto de capacidades de minería de datos, análisis predictivo y modelado.

<sup>2</sup> Página oficial de Palisade: <http://www.palisade-lta.com/industria/clientes.asp>

Minitab es uno de los principales proveedores de software y servicios para mejora de la calidad y enseñanza de estadística. Más del 90% de las empresas de la lista Fortune 100 usan Minitab Statistical Software, nuestro producto emblemático, y más estudiantes de todo el mundo han aprendido estadística con Minitab que con cualquier otro software. Minitab, LLC. es una compañía de propiedad privada cuya sede principal se encuentra en State College, Pennsylvania, EE.UU., y tiene subsidiarias en el Reino Unido, Francia, Alemania, Hong Kong y Australia [83].

# Capítulo 4 Aplicación en el sector hidroenergético

## 4.1 Introducción

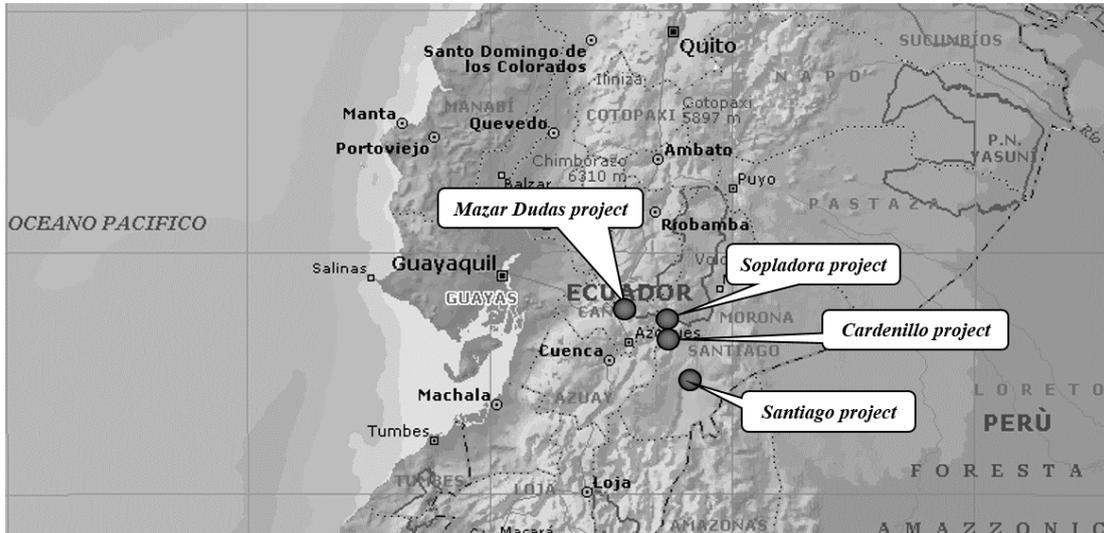
El objetivo de este Capítulo es la aplicación de la metodología CTCR en proyectos hidroeléctricos reales ubicados en la República del Ecuador. Estos casos de estudio corresponden a los proyectos hidroeléctricos denominados: Cardenillo, Mazar Dudas, Sopladora y Santiago, con el detalle expuesto en la Tabla 4-1.

Tabla 4-1: Detalle técnico general de los proyectos hidroeléctricos para los casos de estudio

Información técnica	Proyecto hidroeléctrico			
	Santiago	Cardenillo	Mazar Dudas	Sopladora
Capacidad instalada [MW]	3630	595.65	20.8	487
Factor de planta [%]	47	65	65	60
Río	Santiago	Paute	Mazar	Paute
Tipo Casa de Máquinas	Caverna	Caverna	superficial	Caverna
Tipo de turbina	Francis	Pelton	Pelton	Francis
Unidades	6	6	3	3
Caída hidráulica [m]	134	372	300	360

Los cuatro proyectos se localizan al sureste de la república del Ecuador, dentro de la región hidrográfica del Amazonas. Los proyectos Santiago y Cardenillo se emplazan en su totalidad en la provincia de Morona Santiago a una altura aproximada de 280 msnm y 550 msnm respectivamente. El proyecto Sopladora se ubica en las provincias del Azuay y Morona Santiago a una altura aproximada de 940 msnm. Y, el proyecto Mazar Dudas se emplaza en la provincia del Cañar a una altura aproximada de 2300 msnm. En la Figura 4-1 se presenta su ubicación.

Figura 4-1: Ubicación geográfica de los proyectos hidroeléctricos en la república del Ecuador



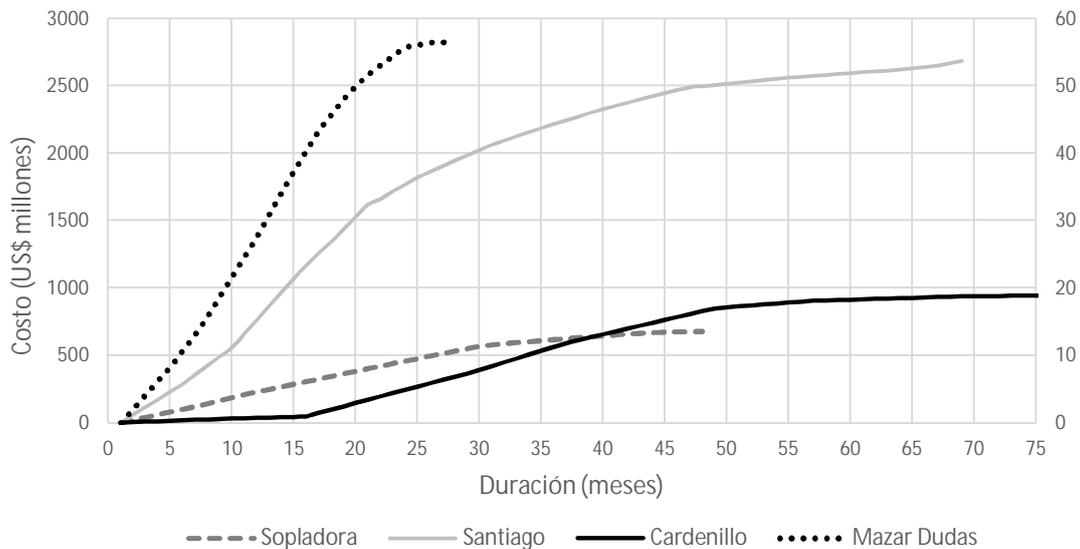
Los cronogramas de los proyectos analizados son las entradas fundamentales de los modelos de simulación. Los cronogramas presentan el conjunto de tareas, sus interrelaciones, sus costos y su distribución en el tiempo. En la Tabla 4-2 se presentan las características principales de los cronogramas de los proyectos, donde se detalla el número de tareas, costos y duraciones totales. Estos cronogramas fueron elaborados y utilizados por las empresas constructoras en el caso de Mazar Dudas y Sopladora. Para el caso de Santiago y Cardenillo, los cronogramas fueron elaborados por las empresas diseñadoras. Dependiendo del criterio de cada empresa, los cronogramas presentan más o menos detalle en cuanto al número de tareas totales, tendiendo un rango entre 120 y 1306 tareas. Los diseñadores y constructores de estos proyectos, en base a su experiencia, han definido la duración y el costo total, tendiendo los rangos de 27-75 meses y 56-2684 US\$ millones. Las duraciones y costos planificados reflejan que los proyectos son de gran envergadura.

Tabla 4-2: Características de los cronogramas de los proyectos en análisis

Proyecto hidroeléctrico	Total de actividades	Actividades resumen	Duración planificada [meses]	Costo planificado [US\$ millones]
Santiago	797	29	68	2684
Cardenillo	120	37	75	944
Mazar Dudas	1306	29	27	56
Sopladora	562	29	47	678

Los cronogramas permitieron la construcción de las curvas Costo Acumulado-Duración (S-Curves) que representan las líneas base de comparación de avance del proyecto, según la técnica del EVM. En la Figura 4-2 se presentan las líneas base de los proyectos en análisis.

Figura 4-2: S-Curvas que representan las líneas base de los proyectos en análisis. La escala secundaria representa exclusivamente los costos para el proyecto Mazar Dudas



Se analizaron los resultados obtenidos a través de herramientas estadísticas para verificar su eficiencia en comparación con la metodología EVM.

#### 4.1.1 El sector hidroenergético en el Ecuador

En la última década, el Ministerio de Electricidad y Energía Renovable de la república del Ecuador, en cumplimiento del Plan Nacional de Desarrollo del país, ha impulsado la planificación y construcción simultánea de varias centrales hidroeléctricas en el país. A partir del año 2007 hasta la presente fecha, el estado ecuatoriano ha construido quince centrales hidroeléctricas, de las cuales ocho se encuentran concluidas y en funcionamiento (Tabla 4-3), y siete centrales que a la fecha continúan en construcción (Tabla 4-4) [84].

Tabla 4-3: Centrales hidroeléctricas construidas en el Ecuador entre los años 2007-2016

Nombre de Central	Provincia	Año de operación	Potencia Nominal
			[MW]
Mazar	Azuay	2010	163.00
San Francisco	Tungurahua	2007	212.00
Ocaña	Cañar	2012	26.10
Baba	Los Ríos	2015	42.20
Manduriacu	Imbabura, Pichincha	2015	63.36
Mazar Dudas: Alazán	Cañar	2016	6.23
Sopladora	Azuay	2016	487.00
Coca Codo Sinclair	Napo, Sucumbíos	2016	1500.00
Totales			2499.89

Fuente: Elaborado por el autor con datos tomados de [84] [85] [86]

Tabla 4-4: Proyectos hidroeléctricos actualmente en construcción en el Ecuador con inversión pública

Nombre de proyecto	Provincia	Potencia Instalada	Energía media
		[MW]	[GWh/año]
Minas San Francisco	Azuay, El Oro, Loja	275.00	1290.80
Mazar Dudas	Cañar	21.80	125.30
Chorrillos	Zamora Chinchipe	4.00	23.00
Delsitanisagua	Zamora Chinchipe	180.00	1411.00
Palmira Nanegal	Pichincha	10.00	77.00
Toachi- Pilatón	Pichincha, Cotopaxi	254.40	1120.00
Quijos	Napo	50.00	350.65
Total		795.20	4272.45

Fuente: Elaborado por el autor con datos tomados de [84] [86]

#### 4.1.2 Capacidad hídrica en el Ecuador

De acuerdo al Plan Nacional Eléctrico [84], el potencial hidroeléctrico del Ecuador es el siguiente:

- Potencial hidroeléctrico teórico medio, estimado con caudales medios mensuales: 91,000 MW
- Potencial técnicamente factible: 31,000 MW
- Potencial económica factible: 22,000 MW

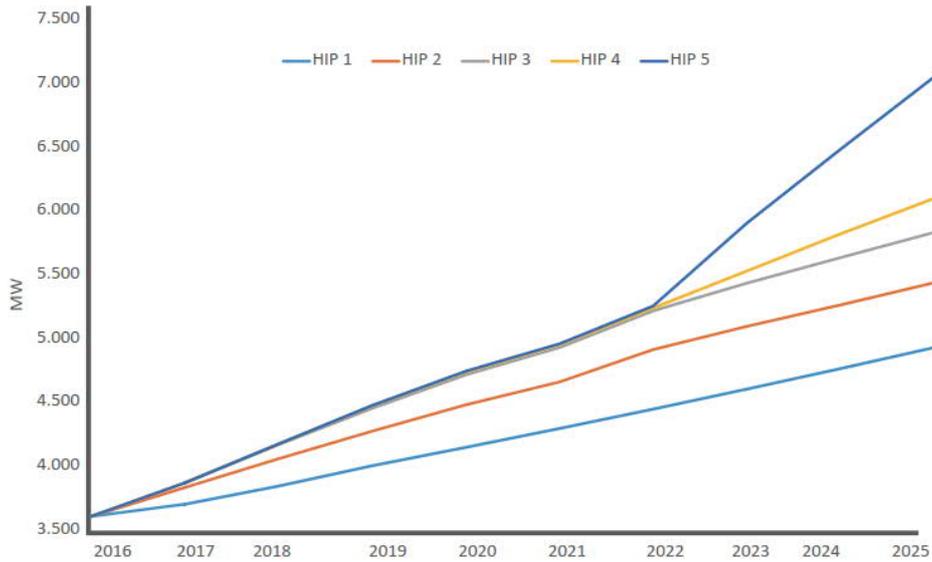
Por otra parte, a la conclusión de los proyectos hidroeléctricos que se encuentran en construcción, se estima que se alcanzará una potencia efectiva hidroeléctrica de 5,401 MW, lo que significa que se aprovecharía apenas un 24.55% del potencial total del país en términos de hidroelectricidad.

#### 4.1.3 Planificación de la demanda

Los estudios de la proyección de la demanda eléctrica consideran características dinámicas del uso de la energía de los usuarios, considerándose además variables como el producto interno bruto, variables macroeconómicas, etc., lo que lleva a proyecciones con 5 hipótesis.

La proyección de la demanda máxima en potencia al año 2025 oscila entre 5,000 a 7,000 MW aproximadamente como se presenta en la Figura 4-3.

Figura 4-3: Proyección de la demanda máxima de potencia en el Ecuador



Fuente y elaboración: [84]

#### 4.1.4 Plan de expansión de la generación en el Ecuador

En base al estudio de la demanda y sus proyecciones del Plan Nacional Eléctrico [84], se prevé que el gobierno ecuatoriano inicie a corto plazo la construcción de nuevos proyectos hidroeléctricos, ya estudiados e identificados, como se detalla en la Tabla 4-5.

Tabla 4-5: Proyectos hidroeléctricos estudiados y proyectados en el Ecuador para el año 2023

Nombre de proyecto	Provincia	Potencia	Energía media	Año de generación
		[MW]	[GWh/año]	
Santa Cruz	Zamora Chinchipe	138.00	964.00	2023
Paute Cardenillo	Morona Santiago	595.63	3409.00	2023
Santiago Fase I	Morona Santiago	600.00	2470.00	2023
Santiago Fase II	Morona Santiago	600.00	2470.00	2023
Santiago Fase III	Morona Santiago	600.00	2470.00	2023
Santiago Fase IV	Morona Santiago	600.00	2470.00	2023
Bloque de proyectos menores	varios sitios del país	140.00	800.00	2023
Totales		3273.63	15053.00	

Fuente: Elaborado por el autor con datos tomados de [84]

## 4.2 Centrales hidroeléctricas como proyectos complejos de construcción

### 4.2.1 Centrales hidroeléctricas

Una central hidroeléctrica es el conjunto de infraestructura civil, arquitectónica y electromecánica, que aprovecha la energía contenida en una masa de agua y la transforma en energía eléctrica. Una central hidroeléctrica transporta el agua desde el nivel en el que se encuentra en la naturaleza hasta un nivel inferior en el que se encuentran instaladas las turbinas hidráulicas. El agua transportada acciona las turbinas, y estas activan los generadores que producen la energía eléctrica.

Las centrales hidroeléctricas pueden subdividirse de acuerdo a varios criterios [87], así:

a). Por su altura del salto:

- De alta caída: mayor a 150 m
- De media caída: entre 50 m y 150 m
- De baja caída: entre 2 m y 20 m

b). Por su capacidad de generación, cuyos límites son arbitrarios dependiendo de la regulación en los diferentes países del mundo. Como ejemplo:

- Centrales de más de 50 MW
- Centrales de entre 10 MW y 50 MW
- Centrales de menos de 10 MW

c). Por el tipo de operación:

- De agua fluyente, las que no disponen de un embalse.
- Con embalse o de regulación, disponen de un embalse, y las centrales pueden estar ubicadas a pie de presa o al final de una conducción.

d). Según la demanda que satisfacen:

- Centrales de base: proporcionan la energía necesaria que se consume de forma permanente en el sistema.
- Centrales de punta: Suministran la energía necesaria de las grandes demandas que se presentan sólo unas pocas horas al día (puntas de consumo)

#### 4.2.2 Principales componentes de una central hidroeléctrica

Por la hidrología, geología y geomorfología del entorno, cada central hidroeléctrica tiene sus condiciones técnicas estrictamente particulares, que llevan a diseños y equipamientos únicos; sin embargo en términos muy generales se puede describir como componentes principales de una central hidroeléctrica los siguientes:

- a. Presa.- Se utilizan para almacenar y desviar el cauce de un río hacia el sistema de conducción hidráulica de la central, además de aumentar el salto necesario para la generación de energía.

Existen varios tipos de presas que pueden ser utilizados, siendo la elección del mismo dependiente de las características topográficas, geológicas y geotécnicas que se encuentran en el terreno. Pueden clasificarse, por su forma de trabajo, en dos grandes categorías: de gravedad y de bóveda. En las primeras todo el empuje que ejerce el agua almacenada en el embalse es contrarrestado por el propio peso de la presa, debido al gran volumen en el que incurre este tipo de estructuras; en las presas de tipo bóveda la estabilidad se basa en la transmisión del empuje de agua hacia las laderas del valle, debiendo tener la presa cierta curvatura que transfiera la componente horizontal del empuje hacia los laterales del valle.

- b. Mecanismos de control de crecidas.- Son estructuras adosadas a la presa cuya principal función es la de protegerla contra las inundaciones. Estos pueden ser elementos fijos y móviles, siendo los primeros más comúnmente conocidos como vertederos y los segundos como compuertas o desagües. En ciertas presas, los desagües de fondo son utilizados para la evacuación del sedimento acumulado.
- c. Obra de toma y conducción.- La obra de toma consiste en facilitar el ingreso de agua hacia la tubería de conducción, impidiendo o dificultando el paso de elementos sólidos hacia la central. Además cuenta con un sistema de compuertas que permiten regular el caudal de llegada hacia la casa de máquinas para la generación. La conducción puede ser realizada mediante canales en superficie o tuberías subterráneas a presión,

procedimiento en el que debe primar que las pérdidas que se den en dichos tramos sean las menores posibles.

- d. Casa de máquinas.- es la infraestructura donde están ubicados los equipos que son los responsables de la transformación de energía potencial a energía mecánica, para posteriormente transformarla en energía eléctrica. Las casas de máquinas pueden ser superficiales o subterráneas.
- e. Obras de descarga.- es la infraestructura civil que conduce el agua turbinada y la devuelve a la cuenca hídrica.

#### 4.2.3 Complejidad en proyectos hidroeléctricos

Para analizar la complejidad de un proyecto hidroeléctrico, se realizó una comparativa entre la definición de “proyecto complejo” según la Asociación Internacional de Gestión de Proyectos – International Project Management Association IPMA [31], y las características indiscutibles de un proyecto hidroeléctrico, y los resultados se detallan en la Tabla 4-6.

Tabla 4-6: Análisis de características de un proyecto complejo según IPMA y aplicado a proyectos hidroeléctricos

Características de un proyecto complejo según IPMA	Comparativa con proyecto hidroeléctrico
Muchos subsistemas / sub-proyectos y elementos interrelacionados.	Un proyecto hidroeléctrico cumple esta característica, ya que está constituido por una gran cantidad de subsistemas y sub-proyectos y elementos interrelacionados, de cada sistema

	<p>principal como: presa, manejo hídrico, paso temporal, accesos, túneles subterráneos, cavernas, casa de máquinas, tuberías metálicas, equipo hidromecánico, equipo eléctrico y electrónico, entre otros, y cada uno de estos se descompone en varias decenas de subsistemas y elementos, y muchos de estos son subcontratados con varias empresas especializadas como sub- proyectos.</p>
<p>Varias organizaciones están involucradas en el proyecto y / o diferentes unidades en la misma organización pueden beneficiarse o proporcionar recursos para un proyecto complejo.</p>	<p>Un proyecto hidroeléctrico cumple esta característica, ya que está conformado por varios involucrados que deben trabajar conjuntamente y coordinadamente, como: contratista de obras civiles, contratista equipo hidromecánico, contratista eléctrico y electrónico, empresa fiscalizadora, empresas coordinadoras del estado, organismos de control del estado, entre otras, y a la vez, cada una de estas tiene múltiples subcontratos con otras empresas especialistas sub-contratadas.</p>
<p>Varias y diferentes disciplinas trabajan en un proyecto complejo.</p>	<p>Un proyecto hidroeléctrico cumple esta característica, al estar involucrado de manera directa y paralela al menos con las disciplinas siguientes dentro de la ingeniería: geología, hidrología, hidráulica, eléctrica, mecánica,</p>

	electrónica, industrial, social y ambiental, civil, arquitectónica, entre otras.
Varias fases diferentes, a veces superpuestas.	Un proyecto hidroeléctrico cumple esta característica, tanto la construcción de las obras de captación como la presa, obras subterráneas como túneles y casa de máquinas, el equipo hidromecánico, entre otros, tienen decenas de fases diferentes y relacionadas que deben ser ejecutadas para llegar a ser complementadas.
Muchos de los métodos, técnicas y herramientas disponibles y que se necesitan en la gestión de proyectos, se aplican en la gestión de un proyecto complejo.	Un proyecto hidroeléctrico cumple con esta característica, ya que al estar involucrados en estos proyectos costos en millones y plazos de años, las empresas involucradas buscan constantemente las mejores prácticas en la gestión de proyectos con la finalidad de conseguir el éxito.

De acuerdo al estudio realizado por Ammen y Jacob [21], existen características de un proyecto que influyen en la complejidad de este, en la Tabla 4-7 se realiza el análisis de estas características aplicadas a un proyecto hidroeléctrico.

Tabla 4-7: Características de un proyecto complejo según Ammen y Jacob aplicado a un proyecto hidroeléctrico

Características de un proyecto complejo según Ammen y Jacob	Comparativa con proyecto hidroeléctrico
La cantidad de componentes de un proyecto y su interdependencia resultan un factor clave que influye en la complejidad.	Bajo este concepto, una central hidroeléctrica está constituida por una gran cantidad de componentes interdependientes, por tanto cumple como un proyecto con gran complejidad, según el estudio.
El tamaño y dificultades de ejecución del proyecto influyen significativamente en los niveles de complejidad.	Un proyecto hidroeléctrico es considerado de gran tamaño, con extensiones en kilómetros, y las características geológicas, hidrología, entre otras, generan gran dificultad en su ejecución. Con lo dicho, un proyecto hidroeléctrico cumple como proyecto de gran complejidad según las características de proyecto complejo del estudio de Ammen y Jacob.

Por otra parte, en el estudio realizado por Kermanshachi, Dao, Shane y Anderson [30] y en el estudio realizado por Brockmann y Kahkonen [29], se plantean una serie de indicadores de complejidad, de los cuales existen varios que cumplen perfectamente para un proyecto hidroeléctrico.

Con el análisis realizado, se concluye que un proyecto hidroeléctrico puede considerarse como un proyecto de gran complejidad.

### 4.3 Desempeño en la gestión de proyectos hidroeléctricos

La complejidad que se presenta en la ejecución de proyectos hidroeléctricos, implica la ejecución de una gran cantidad de tareas de manera simultánea, de diferentes especialidades, de costos elevados y de tiempos de ejecución prolongados, por tanto, esta complejidad se traduce en una administración obligada de riesgos que se presentan en este tipo de proyectos y que generan desviaciones de costos, plazos e incluso alcance en algunos casos.

#### 4.3.1 Situación internacional

A nivel mundial existe evidencia que muestra que en la construcción de proyectos dentro del sector energético, se presentan desviaciones de importante cuantía, tanto en el costo final como en los plazos de ejecución. Estas desviaciones se refieren principalmente a incrementos, tanto en el costo como en los plazos inicialmente planificados.

A continuación se realiza un análisis de trabajos de investigación realizados en referencia a las desviaciones de costos y plazos de proyectos dentro del campo energético a nivel mundial:

- Según estudios realizados por la universidad de Oxford [10], en estas últimas décadas se tiene un significativo incremento en la construcción de grandes proyectos de generación hidroeléctrica que se extienden desde

países como Brasil hasta la China. Los autores analizan si los beneficios de estos proyectos son mayores a los costos que representan su construcción. Según sus autores, la investigación se ha sustentado en una de las bases de datos más grandes y confiables de su género, aplicando una metodología estadística multinivel a estos grandes proyectos hidroeléctricos. Los autores afirman que han tenido éxito en ajustar, de manera parsimoniosa los modelos estadísticos aplicados, para predecir con exactitud las desviaciones en costos y plazos de los proyectos hidroeléctricos.

Este estudio analiza una muestra de 235 proyectos hidroeléctricos, llegando a resultados sorprendentes. Con un percentil 80, los costos de ejecución de los proyectos se incrementan en un 99% de los costos inicialmente planificados, con una media de 90%. Las desviaciones en plazo real ejecutado, presentan retrasos de un 44% en comparación con el plazo planificado.

Este trabajo presenta abundante evidencia empírica que refleja que los presupuestos inicialmente planificados consignan valores menores a los valores reales con los que culminan los proyectos hidroeléctricos. Los autores llaman a esta tendencia como "sesgo optimista" en el momento de pronosticar y preparar los presupuestos.

Entre las conclusiones que sugiere la investigación, indica que la mayoría de los países que emprenden en la construcción de grandes proyectos hidroeléctricos, se incurrirán en desviaciones de incremento de costos y plazos, en términos de valores absolutos, de tal manera que se verá comprometida la relación riesgo rentabilidad de los proyectos, donde se

implementan las recomendaciones sobre la administración integral de riesgos.

- El estudio realizado por el Institute for Energy & the Environment, Vermont Law School, USA [11] se basa en una muestra de 401 proyectos de energía, de los cuales 61 corresponden a proyectos hidroeléctricos que consignan un valor total de inversión de US\$ 271,5 billones con una capacidad instalada de hidroelectricidad de 113.774 MW de potencia.

Los resultados de la inferencia estadística aplicada a los 61 proyectos hidroeléctricos, indican que existe un incremento en los costos planificados promedio de US\$ 2.437,0 millones, representando un incremento promedio del 70,6% sobre el presupuesto inicial, lo dicho se presenta en la Tabla 4-8.

Dentro del conjunto total de proyectos del sector energético analizado, los proyectos hidroeléctricos sobresalen en incrementos de plazos respecto al inicial planificado, con un tiempo promedio mayor al planificado de 118,4 meses. De igual manera, del análisis individualizado de proyectos, son los hidroeléctricos los que presentan el mayor incremento en costos y plazos, con valores de US\$ 2,5 billones y 32,2 meses respectivamente. El incremento promedio del plazo de los proyectos hidroeléctricos es de 43.2 meses como se presenta en la Tabla 4-8.

Tabla 4-8: Incremento en el costo y en el plazo en proyectos de energía

Tipo de proyecto	Número de proyectos	Incremento promedio de Costo		Incremento promedio de Plazo	
		[%]	[US\$ millones]	[%]	[Meses]
Hidroeléctrico	61	70.60	2437.00	63.70	43.20
Nuclear	180	117.30	1282.00	64.00	35.70
Térmico	36	12.60	168.50	10.40	4.80
Eólico	35	7.70	32.80	9.50	0.22
Solar	39	1.30	-4.20	-0.20	-0.20
Transmisión	50	8.00	29.70	7.50	3.50

Fuente: Adaptado por el autor tomando el estudio [11]

En la Tabla 4-9 se presenta una prelación de proyectos hidroeléctricos por los incrementos en costo en un número total de 17 proyectos, dando un incremento promedio de US\$ 8.548,0 millones.

Tabla 4-9: Prelación por incremento en el costo de proyectos hidroeléctricos con presa

Prelación	Año	Nombre del proyecto	Ubicación	Incremento del costo
				[US\$ millones]
1	2012	Three Gorges Dam	China	47630
2	1979	La Grande 2	Canada	17460
3	1978	Sayano-Shushenskaya	Russia	17299
4	1976	Nurek	Tajikistan	15910
5	1984	Tucuruí Dam Stage 1	Brasil	7091
6	2006	Sardar Sarovar Dam	India	6773
7	1991	Itaipu Dam	Brasil/Paraguay	5147
8	1986	Guri (Raul Leoni)	Venezuela	5130
9	1981	Robert-Bourassa	Canada	5010
10	2011	Bakun Hydroelectric Project	Malaysia	3916
11	1974	Tarbela Stage 1	Pakistan	3072
12	2009	Longtan Dam	China	2380
13	1973	Grand Coulee Dam II	United States	2306
14	1968	W.A.C. Bennet	Canada	2099
15	1971	Churchill Falls	Canada	1511
16	1942	Grand Coulee Dam I	United States	1495
17	1986	Chixoy	Guatemala	1083

Fuente: Adaptado por el autor de los datos tomados del estudio [11]

- El estudio realizado por Sovacool, Nugent y Gilbert [88], también autores del artículo anterior, analiza una muestra de 61 proyectos hidroeléctricos con una capacidad instalada de 113.774 MW. Una inversión de US\$277.500 millones. Un incremento de costos en toda la muestra de US\$148.400 millones.

El estudio indica que una de las causas del incremento en los costos es que los proyectos hidroeléctricos son intensivos en uso de materiales, por ejemplo, usa hasta tres veces más concreto que un proyecto de planta nuclear. También el hecho de no poder calcular con precisión los volúmenes de excavación y movimientos de tierras, la composición de la roca, sobre la cual se sustentan las bases de las presas, la calidad de los suelos y sobre todo los riesgos geológicos hace que existan costos escondidos que solo salen a relucir al momento de la construcción.

Importante mencionar que este estudio hace referencia a una investigación de Bent Flyvbjerg, que, de una muestra de 245 proyectos de construcción de presas, de las cuales 186 era para plantas de energía, construidas entre 1934 y 2007 en 65 países en 5 continentes, con un valor de inversión de \$355 mil millones, se encontró un sesgo sistemático de incremento de costo, al comparar el costo real con respecto del presupuesto referencial original. En promedio el incremento fue del 96% sobre el presupuesto referencial.

El estudio indica que los incrementos de costos son multi-causales, no se puede señalar una sola razón técnica en particular. Una deficiente gerencia de proyecto y falta de transparencia son tan influyentes como las razones técnicas. Los incrementos de costos no siempre son fortuitos o aleatorios, y en este sentido

- El estudio realizado por Awojobi y Jenkins [12], analiza aspectos de costos de una muestra de 58 proyectos con presas, que fueron financiados por el Banco Mundial en el periodo de 1976 a 2005. Se realiza una evaluación de los beneficios generados por estas inversiones.

De los resultados obtenidos por el estudio, se desprende que existe un incremento promedio de costo del 27% con una desviación estándar de 34,7%. La probabilidad calculada por los autores de que exista un incremento de los costos de 20% es del 58%. La probabilidad de ocurrencia de un sobre costo mayor al 50% es de 25,5%.

Por regiones los datos demuestran que Asia tiene los menores incrementos de costos, con un 7% por encima de los costos referenciales estimados. Esto contrasta con los datos de América Latina donde el promedio de incrementos de costos es del 54% sobre los precios estimados, es esto, 7 veces mayores a los incrementos de costos del Asia, con excepción de Chile. En África el promedio de incremento de costos es del 25,5% y para Oceanía el promedio fue de 26,2 y finalmente Europa con un promedio de incremento de costos del 15%.

El estudio encontró que el 58% de los proyectos con presas, incurrieron en un incremento promedio de plazos de 12 meses, lo que significa 16% del cronograma referencial. Este incremento de los plazos se puede traducir en un costo del 3,5% del costo real de construcción del proyecto. En el caso de África, 9 de 13 proyectos presentaron incremento de plazos y el incremento promedio fue de 16,3% del plazo establecido en el cronograma referencial. Esto equivaldría a un costo social del 8,4% del costo estimado referencial del proyecto. En América Latina 11 de los 15 proyectos estudiados sufrieron incremento de plazos, con un promedio de 17 meses más del plazo estimado, lo que equivale a un 23% más de plazo. Esto llevó

a un costo social del 4,4% del costo estimado referencial del proyecto. Asia ha demostrado mejores cifras, con un promedio de plazo de construcción de 89 meses con un incremento promedio de tan solo 8 meses. De los 22 proyectos estudiados del Asia, solo 11 proyectos presentaron incrementos significativos que representa un costo social del 1,9% del costo estimado referencial. En Europa, con una muestra pequeña de 5 proyectos, el incremento promedio fue de 18 meses, es decir, un 22,6% más de tiempo sobre el estimado referencial. El costo social neto del incremento es equivalente a un 7,3% del costo estimado referencial del proyecto. Finalmente, de los 3 proyectos construidos en Oceanía solo uno de los proyectos tuvo un incremento de plazo considerable, del 26,9% del plazo estimado referencial, cuando el incremento promedio en la región es de 14,4% del plazo estimado referencial y el costo social del incremento equivale a 0,3% del costo estimado referencial del proyecto.

El estudio concluye que, a pesar de que existe evidencia que demuestra que los costos y los plazos de construcción de los proyectos hidroeléctricos, son sistemáticamente subestimados en la etapa de estudios de evaluación, los resultados de este estudio demuestran que las inversiones en estos proyectos son económicamente viables, es decir, que los beneficios sociales que generan estos proyectos sobrepasan los incrementos de costos y plazos de los mismos.

- El estudio realizado por Awojobi y Jenkins [89], discute una metodología que involucra la incertidumbre de los costos de construcción. Realiza una proyección de los costos aplicando la metodología Pronóstico de Clase Referencial "Reference Class Forecasting" (RCF) para mejorar la confianza de los costos utilizados para la toma de decisiones bajo escenarios de incertidumbre.

Este estudio se basa en un portafolio de 58 proyectos con represas. La gran complejidad en términos del tamaño de las plantas y la altura de la represa, son unos de los orígenes del “sesgo optimista” y parámetros estratégicos utilizados para subestimar los costos de los proyectos. Este estudio indica que un proyecto hidroeléctrico evaluado con un margen de error del 10% en el pronóstico de los costos, realmente necesitaría:

- Un aumento en el margen de error del 119% en el pronóstico de costos.
- Un aumento del 90%, comparado con un 20% utilizado en la planificación, con respecto a la tolerancia al riesgo, con el fin de minimizar el efecto adverso de la incertidumbre y el sesgo optimista en el pronóstico de los costos de construcción de un proyecto hidroeléctrico con represa.

Este estudio concluye indicando que los errores en los pronósticos de costos son comunes en la construcción de proyectos hidroeléctricos y que pueden ser exacerbados por la complejidad del tamaño del proyecto y la altura de la represa. Los retrasos en la terminación de la infraestructura y la decisión de usar bienes, partes y materiales extranjeros en la construcción de la represa contribuyen a los errores de pronóstico de los costos.

- El estudio realizado por Love, Wang, Sing y Tiong [90] se basa en una estadística de sobrecostos de 276 proyectos en Australia. Concluyendo que Los sobrecostos se han atribuido a un “sesgo optimista” y a la “malinterpretación estratégica” en la preparación del presupuesto de inversión del proyecto.

Este estudio usa una base de datos de 276 proyectos en Australia para determinar la distribución de probabilidades, con la mejor bondad de

ajuste, para elaborar evaluaciones de proyectos con probabilidades realistas de la ocurrencia de sobrecostos.

Se aplicó las pruebas de bondad de ajuste de Kolmogorov-Smirnov y Anderson-Darling a la muestra de datos de sobrecostos de los proyectos y el resultado fue que el modelo de tres parámetros de Frechet, presentó la mejor bondad de ajuste, en comparación con otros modelos como Cauchy, Wakeby y Burr. Con los resultados del modelo de Frechet la probabilidad que un proyecto incurra en un sobrecosto, entre 1% y 5%, es de 16%. La probabilidad de que un proyecto tenga un sobrecosto mayor a la media de 12,22% es 60%. La siguiente tabla nos presenta la distribución de probabilidad genérica de sobrecostos en los proyectos.

El estudio concluye que existen dos criterios para determinar cuándo se produce un sobrecosto, en la literatura de infraestructura y transporte desde el momento en que se decide construir. En contraste, la literatura de construcción e ingeniería desde el momento que se adjudica el contrato. Cuando se usa el criterio "se decide construir" la magnitud de los sobrecostos pueden ser fenomenalmente altos y alarmistas para la población. Pero cuando el criterio de evaluación es momento de la adjudicación del proyecto, la magnitud del sobrecosto cambia dramáticamente, a tal extremo que no es raro ver la disposición de ejecución de obras adicionales. Utilizando el momento de adjudicación del contrato, como punto de referencia, la media de sobrecostos de los 278 proyectos fue de 12,2%, no se encontró diferencias estadísticamente significativas entre los métodos de licitación, tipo de proyecto o tamaño del proyecto. Finalmente, se determinó que los datos empíricos no se ajustan adecuadamente a una distribución normal (gaussiana), se utilizó pruebas de bondad de ajuste no paramétricas, en las que se determinó que el modelo de tres parámetros de Frechet es el que mejor bondad de ajuste

presenta, para predecir la probabilidad de sobrecostos en los proyectos en Australia.

#### 4.3.2 Situación en el Ecuador

Con lo expuesto en el numeral 1.1, en la última década, el Ecuador ha tenido que enfrentar la construcción simultánea de al menos quince centrales hidroeléctricas, y a su vez, se prevé la construcción inmediata de varios proyectos que permitirán la instalación adicional de 3273.63 MW de potencia, sin duda el reto continúa, pero, resulta importante hacer un análisis sobre los resultados de la gestión y dirección de los proyectos.

En la Tabla 4-10 se presenta un análisis de nueve proyectos hidroeléctricos construidos por el gobierno ecuatoriano en la última década, enfocando la gestión de los costos y tiempos de construcción, sin duda los resultados evidencian desviaciones importantes en costos y en plazos, es decir, los proyectos costaron y se demoraron más de lo planificado.

Respecto al costo, se evidencia que existen sobrecostos o incrementos que están en el rango del 9% al 116% con un promedio de 35%.

Respecto al tiempo de construcción, se evidencia que existen sobreplazos o incrementos del plazo que están en el orden del 13% al 194% con un promedio de 60%.

Tabla 4-10: Análisis de costos y plazos en la ejecución de proyectos hidroeléctricos en el Ecuador

Proyecto	Costo	Costo	Costo		Tiempo	Fecha Inicio construcción	Fecha fin estimada 2014**	Retrasos en plazo	
	estimado	estimado	incremento		estimado				
	Inicial	2014**	2014	[%]	Inicial				
	[USD Millones]	[USD Millones]	[USD Millones]	[%]	[meses]			[meses]	[%]
Coca Codo Sinclair	1,979	2245	266	13	68	Feb-16	Nov-16	9	13
Minas San Francisco*	474	556	82	17	50	Mar-16	Dic-17	21	43
Delsitanisagua*	185	266	81	44	53	Mar-16	Dic-17	21	40
Quijos*	64	138	74	116	51	Mar-16	Dic-17	21	42
Mazar Dudas*	47	51.2	4	9	24	Feb-14	Dic-17	47	194
Sopladora	672	755	83	12	48	Dic-15	Dic-16	12	25
<b>Totales</b>	<b>3,421</b>								

\* Proyectos que se encuentran aún en construcción

\*\* Estimaciones realizadas en el 2014

Fuente: elaborado por el autor con datos tomados de [84] [91]

## 4.4 Resultados de ponderación de los factores K

En el numeral 3.2.7 se presentó la metodología para la ponderación de los factores K que permiten generar pesos relativos para los componentes costo, tiempo, ruta crítica y riesgos. En este punto se presenta la aplicación y resultados del modelo AHP para este fin.

El modelo AHP se aplicó a los cuatro casos de estudio planteados al inicio de este capítulo, donde el objetivo es ponderar los factores K en base a criterios y alternativas. A continuación se presentan los resultados obtenidos para los proyectos hidroeléctricos analizados.

La construcción de las matrices de comparación por pares para los criterios nivel 1, son matrices con valoraciones distintas para los cuatro casos de estudio, esto debido a las particularidades y características propias de cada proyecto respecto a sus condiciones de: materiales de construcción, disponibilidad de accesos, tipo

de obras de captación, túneles de conducción, tipo de casa de máquinas, obras subterráneas, tipo de equipamiento electromecánico, características ambientales y sociales. En cuanto al análisis de los criterios nivel 2: tiempo, costo, criticidad y riesgos, son análisis independientes de la particularidad de cada proyecto hidroeléctrico, más bien el análisis se lo hace por tipo de proyecto, en el caso de esta Tesis Doctoral se realiza para proyectos hidroeléctricos, lo que significa que se tiene como resultado una única matriz de comparación por pares para criterios nivel 2 para los cuatro casos de estudio. Lo dicho se presenta en los numerales siguientes.

#### 4.4.1 Factores K para proyecto hidroeléctrico Cardenillo

La matriz de comparación por pares para el proyecto Cardenillo se presenta en la Tabla 4-11. Se utilizó la escala de razón en términos de preferencia, importancia o probabilidad sobre la base de la escala propuesta por Saaty. Se presenta el Valor Propio y los resultados de consistencia a través de la Razón de Consistencia (RC) y el Índice de Consistencia (IC).

Tabla 4-11: Matriz de comparación por pares para el proyecto hidroeléctrico Cardenillo

		C.	O.	Social				
	Material	Accesos	Captación	Conducción	Máquinas	Subterráneas	Equipamiento	Ambiental
Material	1	1/3	1/7	1/5	1/7	1/5	1/3	3
Accesos	3	1	1/5	1/3	1/5	1/3	3	5
Captación	7	5	1	3	3	3	5	9
Conducción	5	3	1/3	1	1/3	3	3	7
C. Máquinas	7	5	1/3	3	1	3	5	9
O.	5	3	1/3	1/3	1/3	1	3	7
Subterráneas	3	1/3	1/5	1/3	1/5	1/3	1	5
Equipamiento	1/3	1/5	1/9	1/7	1/9	1/7	1/5	1
Social								
Ambiental								
Sumatoria	31.33	17.87	2.65	8.34	5.32	11.01	20.53	46.00

Valor propio =8.972

CI = 0.139

RC = 0.093

Se continuó con la construcción de la matriz de prioridades para definir la ponderación de cada factor K y los resultados se presentan en la Tabla 4-12.

Tabla 4-12: Matriz de prioridades para el proyecto Cardenillo

	Material	Accesos	Captación	Conducción	C. Máquinas	O. Subterráneas	Equipamiento	Social Ambiental
K1	70.70%	16.62%	19.71%	46.15%	19.71%	29.77%	7.04%	62.46%
K2	9.24%	15.33%	15.54%	13.56%	15.54%	8.99%	22.37%	26.94%
K3	10.81%	63.92%	54.96%	12.00%	54.96%	11.51%	63.04%	5.30%
K4	9.24%	4.13%	9.79%	28.29%	9.79%	49.73%	7.55%	5.30%
Síntesis	3.19%	7.37%	31.44%	15.08%	23.60%	11.81%	5.69%	1.83%

Se finaliza con el cálculo de pesos para los cuatro factores K como se presenta en la Tabla 4-13.

Tabla 4-13: Pesos de los cuatro factores "K" para el proyecto Cardenillo

Coeficiente	Alternativas	Ponderación
K1	Costo de actividades	0.26
K2	Tiempo de ejecución de las actividades	0.15
K3	Tiempos de actividades en Ruta Crítica	0.42
K4	Actividades en riesgo de sobrecosto y/o sobreplazo	0.17

#### 4.4.2 Factores K para proyecto hidroeléctrico Mazar Dudas

Al igual que en los casos de estudio anteriores, para el proyecto hidroeléctrico Mazar Dudas, en la Tabla 4-14 se presenta la matriz de comparación por pares, detallando el Valor Propio y los resultados de consistencia a través de la Razón de Consistencia (RC) y el Índice de Consistencia (IC).

Tabla 4-14: Matriz de comparación por pares para el proyecto hidroeléctrico Mazar Dudas

	Material	Accesos	Captación	Conducción	C. Máquinas	O. Subterráneas	Equipamiento	Social Ambiental
Material	1	5	1/3	1/5	1/3	1/3	5	3
Accesos	1/5	1	1/5	1/9	1/7	1/5	1	1/3
Captación	3	5	1	1/5	1/3	1/3	5	3
Conducción	5	9	5	1	3	5	9	7
C. Máquinas	3	7	3	1/3	1	3	7	5
O. Subterráneas	3	5	3	1/5	1/3	1	5	3
Equipamiento	1/5	1	1/5	1/9	1/7	1/5	1	1/3
Social Ambiental	1/3	3	1/3	1/7	1/5	1/3	3	1
Sumatoria	15.73	36.00	13.07	2.30	5.49	10.40	36.00	22.67

Valor propio =8.941

CI = 0.134

RC = 0.091

La matriz de prioridades para definir la ponderación de cada factor K se exponen en la Tabla 4-15.

Tabla 4-15: Matriz de prioridades para el proyecto Mazar Dudas

	Material	Accesos	Captación	Conducción	C. Máquinas	O. Subterráneas	Equipamiento	Social Ambiental
K1	70.70%	16.62%	19.71%	46.15%	19.71%	29.77%	7.04%	62.46%
K2	9.24%	15.33%	15.54%	13.56%	15.54%	8.99%	22.37%	26.94%
K3	10.81%	63.92%	54.96%	12.00%	54.96%	11.51%	63.04%	5.30%
K4	9.24%	4.13%	9.79%	28.29%	9.79%	49.73%	7.55%	5.30%
Síntesis	8.49%	2.40%	10.71%	37.15%	20.57%	13.43%	2.40%	4.85%

Al final, los pesos para los cuatro factores K exclusivos del proyecto hidroeléctrico Mazar Dudas se presenta en la Tabla 4-16.

Tabla 4-16: Pesos de los cuatro factores K para el proyecto Mazar Dudas

Coeficiente	Alternativas	Ponderación
K1	Costo de actividades	0.37
K2	Tiempo de ejecución de las actividades	0.14
K3	Tiempos de actividades en Ruta Crítica	0.27
K4	Actividades en riesgo de sobre costo y/o sobreplazo	0.22

#### 4.4.3 Factores K para proyecto hidroeléctrico Sopladora

En referencia al proyecto hidroeléctrico Sopladora, en la Tabla 4-17 se presenta la matriz de comparación por pares, indicando el Valor Propio y los resultados de consistencia a través de la Razón de Consistencia (RC) y el Índice de Consistencia (IC).

Tabla 4-17: Matriz de comparación por pares para el proyecto hidroeléctrico Sopladora

	Material	Accesos	Captación	Conducción	C. Máquinas	O. Subterráneas	Equipamiento	Social Ambiental
Material	1	1/3	3	1/7	1/7	1/7	1	3
Accesos	3	1	5	1/5	1/5	1/5	3	5
Captación	1/3	1/5	1	1/9	1/9	1/9	1/3	3
Conducción	7	5	9	1	1	1/3	7	9
C. Máquinas	7	5	9	1	1	1	7	9
O. Subterráneas	7	5	9	3	1	1	7	9
Equipamiento	1	1/3	3	1/7	1/7	1/7	1	3
Social Ambiental	1/3	1/5	1/3	1/9	1/9	1/9	1/3	1
Sumatoria	26.67	17.07	39.33	5.71	3.71	3.04	26.67	42.00

Valor propio =8.850

CI = 0.121

RC = 0.082

La definición de la ponderación de cada factor K para el proyecto Sopladora se realiza a través de la matriz de prioridades. Los resultados se presentan en la Tabla 4-18.

Tabla 4-18: Matriz de prioridades para el proyecto Sopladora

	Material	Accesos	Captación	Conducción	C. Máquinas	O. Subterráneas	Equipamiento	Social Ambiental
K1	70.70%	16.62%	19.71%	46.15%	19.71%	29.77%	7.04%	62.46%
K2	9.24%	15.33%	15.54%	13.56%	15.54%	8.99%	22.37%	26.94%
K3	10.81%	63.92%	54.96%	12.00%	54.96%	11.51%	63.04%	5.30%
K4	9.24%	4.13%	9.79%	28.29%	9.79%	49.73%	7.55%	5.30%
Síntesis	4.41%	8.56%	2.74%	22.69%	25.43%	29.81%	4.41%	1.94%

Los pesos para los cuatro factores K se exponen en la Tabla 4-19.

Tabla 4-19: Pesos de los cuatro factores K para el proyecto Sopladora

Coficiente	Alternativas	Ponderación
K1	Costo de actividades	0.31
K2	Tiempo de ejecución de las actividades	0.13
K3	Tiempos de actividades en Ruta Crítica	0.30
K4	Actividades en riesgo de sobrecosto y/o sobreplazo	0.25

#### 4.4.4 Factores K para proyecto hidroeléctrico Santiago

La matriz de comparación por pares para el proyecto Santiago se expone en la Tabla 4-20. De igual manera se presenta el Valor Propio y los resultados de consistencia a través de la Razón de Consistencia (RC) y el Índice de Consistencia (IC).

## Aplicación en el sector hidroenergético

Tabla 4-20: Matriz de comparación por pares para el proyecto hidroeléctrico Santiago

	Material	Accesos	Captación	Conducción	C. Máquinas	O. Subterráneas	Equipamiento	Social Ambiental
Material	1	3	1/7	1/3	1/7	1/3	1	1/7
Accesos	1/3	1	1/9	1/5	1/9	1/5	1/3	1/9
Captación	7	9	1	5	3	5	7	3
Conducción	3	5	1/5	1	1/5	1	3	1/5
C. Máquinas	7	9	1/3	5	1	5	7	3
O. Subterráneas	3	5	1/5	1	1/5	1	3	1/5
Equipamiento	1	3	1/7	1/3	1/7	1/3	1	1/7
Social Ambiental	7	9	1/3	5	1/3	5	7	1
Sumatoria	29.33	44.00	2.46	17.87	5.13	17.87	29.33	7.80

Valor propio = 9.019  
 CI = 0.146  
 RC = 0.098

La matriz de prioridades para definir la ponderación de cada factor K se presenta en la Tabla 4-21.

Tabla 4-21: Matriz de prioridades para el proyecto Santiago

	Material	Accesos	Captación	Conducción	C. Máquinas	O. Subterráneas	Equipamiento	Social Ambiental
K1	70.70%	16.62%	19.71%	46.15%	19.71%	29.77%	7.04%	62.46%
K2	9.24%	15.33%	15.54%	13.56%	15.54%	8.99%	22.37%	26.94%
K3	10.81%	63.92%	54.96%	12.00%	54.96%	11.51%	63.04%	5.30%
K4	9.24%	4.13%	9.79%	28.29%	9.79%	49.73%	7.55%	5.30%
Síntesis	3.47%	1.86%	32.71%	7.20%	24.46%	7.20%	3.47%	19.63%

Los pesos para los cuatro factores K del proyecto hidroeléctrico Santiago se exponen en la Tabla 4-22.

Tabla 4-22: Pesos de los cuatro factores K para el proyecto Santiago

Coficiente	Alternativas	Ponderación
K1	Costo de actividades	0.32
K2	Tiempo de ejecución de las actividades	0.17
K3	Tiempos de actividades en Ruta Crítica	0.38
K4	Actividades en riesgo de sobre costo y/o sobreplazo	0.13

#### 4.4.5 Factores K resultantes

Con los resultados parciales de priorización de alternativas de los factores K de cada proyecto hidroeléctrico analizado, se presenta en la Tabla 4-23 los resultados consolidados, aplicando un promedio para definir la ponderación final de los factores K.

Tabla 4-23: Resultados consolidados de los factores K de los cuatro proyectos analizados

Coficiente	Cardenillo	Río Santiago	Sopladora	Alazán	Promedio
K1	0.26	0.32	0.31	0.37	0.32
K2	0.15	0.17	0.13	0.14	0.15
K3	0.42	0.38	0.30	0.27	0.34
K3	0.17	0.13	0.25	0.22	0.19

Los resultados finales son:

- Costo de actividades (K1) = 0.32
- Tiempo de ejecución de las actividades (K2) = 0.15
- Tiempos de las actividades en Ruta Crítica (K3) = 0.27
- Actividades en riesgo de sobrecosto y/o sobreplazo (K4) = 0.19

#### 4.5 Resultados de los modelos de simulación

En el numeral 3.3 de esta Tesis Doctoral, correspondiente a “Métodos de comprobación”, se indica que la comprobación de la eficiencia de la metodología para el seguimiento y control de proyectos complejos en el sector hidroenergético, se lo realiza a través de la construcción de modelos estocásticos que permitan generar miles de escenarios de comportamiento de cronogramas. Para este estudio se han construido cuatro modelos para los proyectos hidroeléctricos: Cardenillo, Mazar Dudas, Sopladora, y Santiago.

A continuación se presentan los resultados obtenidos para cada caso de estudio.

#### 4.5.1 Resultados de simulación para el proyecto hidroeléctrico Cardenillo

El modelo de simulación para el proyecto hidroeléctrico Cardenillo manejó los datos de entrada siguientes:

- 120 actividades del cronograma maestro
- 37 actividades resumen del cronograma
- Plazo total planificado de
- Costo total planificado de
- 10 000 iteraciones
- Software @Risk
- Variables de entrada: costos y plazos de actividades
- Variables de salida: costo y plazos de simulación

##### Simulación de costos totales

Los resultados obtenidos en la simulación de los costos totales del proyecto hidroeléctrico Cardenillo se presentan en las Figura 4-4 y Figura 4-5. Los resultados indican que la probabilidad de alcanzar el costo inicial planificado de US\$ 995.60 millones es de apenas el 5.4% (Figura 4-4). Con una probabilidad del 95% el costo alcanzaría los US\$ 1,006.36 millones (Figura 4-5).

Figura 4-4: Histograma de costos totales del proyecto Cardenillo con una probabilidad al costo planificado inicial

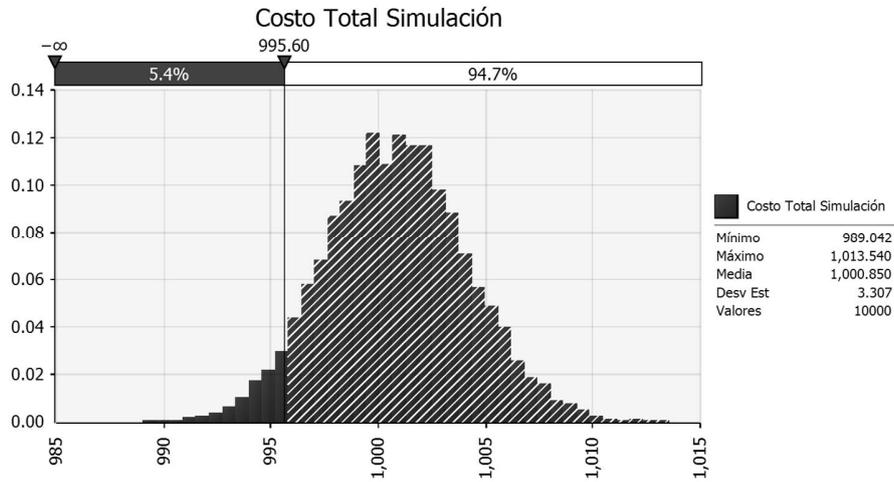
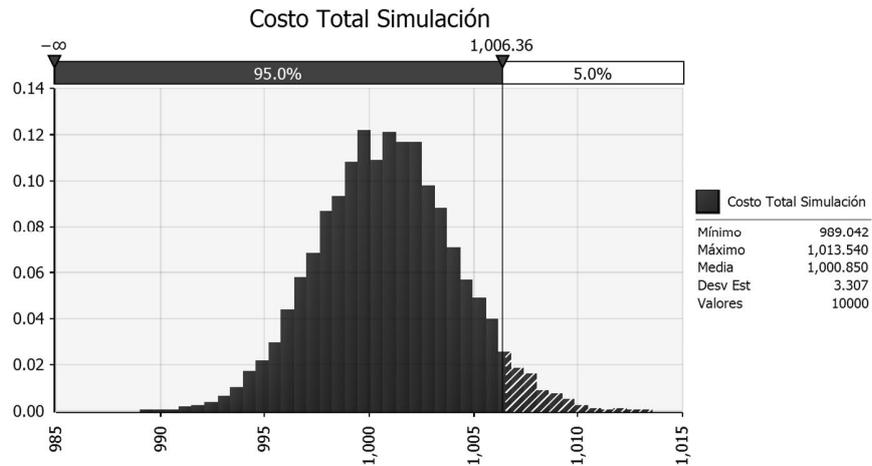


Figura 4-5: Histograma de costos totales del proyecto Cardenillo con una probabilidad del 95%



### Simulación de plazos totales

Los resultados obtenidos en la simulación de los plazos totales del proyecto hidroeléctrico Cardenillo se presentan en las Figura 4-6 y Figura 4-7. Los resultados indican que la probabilidad de culminación dentro del plazo

planificado de 75 meses es de 4.2% (Figura 4-6), por otra parte, con una probabilidad del 95% el plazo final alcanzaría los 83 meses (Figura 4-7).

Figura 4-6: Histograma de plazos totales del proyecto Cardenillo con una probabilidad al plazo planificado inicial

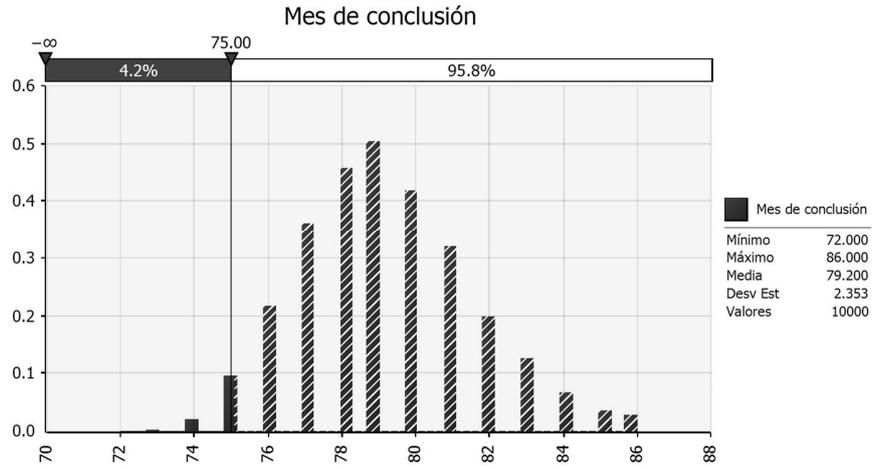
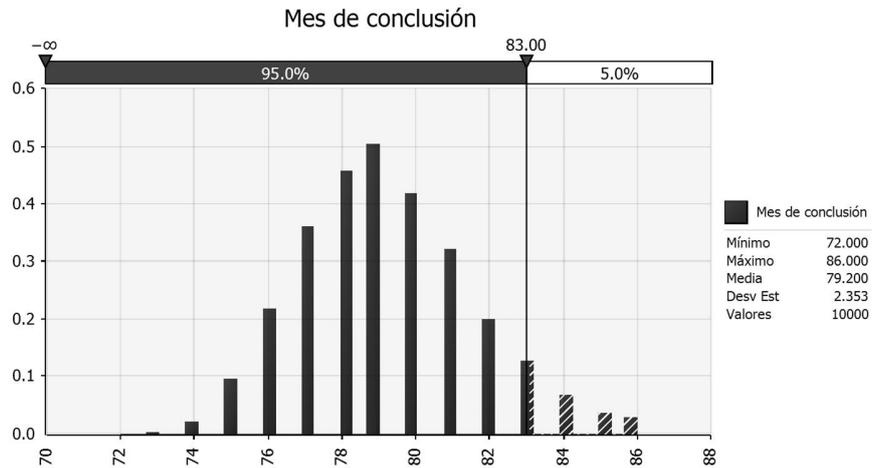


Figura 4-7: Histograma del plazo total del proyecto Cardenillo con una probabilidad del 95%



### Simulación de ajuste de costos

En relación al pronóstico del costo a la conclusión del proyecto Cardenillo aplicando la metodología CTCR que se basa en EVM como se indica en el Capítulo 3 “Proyección de Costos”, se obtuvieron probabilidades que reflejan un incremento del ajuste o eficiencia en los diferentes periodos de tiempo analizados, como se aprecia en la Tabla 4-24. En el mes 5 de ejecución se obtuvo una probabilidad del 17.80% de que el costo pronosticado se ajuste al costo de la simulación, mientras que en el mes 50 de ejecución se tiene una probabilidad del 99.60% y en los meses siguientes se mantiene una probabilidad del 100% hasta la conclusión. Las probabilidades calculadas se basaron en un rango del 2% del monto total planificado ( $\pm$  US\$ 9.4 millones).

Tabla 4-24: Probabilidades de ajuste en el pronóstico del costo para el proyecto Cardenillo

Periodo de Análisis	Earned Value EV	Probabilidad de ajuste del Costo (%)
[meses]	[millones] [Prob. 95%]	[rank 2% $\pm$ 9.4 millones]
5	17.05	17.80
10	32.76	21.30
15	46.94	22.00
20	169.70	55.60
25	291.60	72.80
30	417.60	76.80
35	558.50	87.70
40	677.00	94.90
45	784.50	98.70
50	860.70	99.60
55	896.50	100.00
60	914.40	100.00
65	928.06	100.00
70	939.17	100.00
75	943.00	100.00
Conclusión	944.00	100.00

### Simulación de ajuste de plazos

Para el proyecto Cardenillo, aplicando las metodologías EVM y CTCR en los 10,000 escenarios, se realizaron los pronósticos del plazo a la conclusión del proyecto en diferentes meses de avance del proyecto, utilizando un rango de error de  $\pm 1$  mes.

En las Figura 4-8 a la Figura 4-13, se presentan los histogramas de frecuencia con las probabilidades calculadas de ajuste del plazo de los métodos EVM y CTCR a la conclusión del proyecto, evaluadas a diferentes meses de iniciada la ejecución del proyecto. Para el proyecto Cardenillo se realizó el análisis en los meses 10, 20, 30, 40, 50 y 60 de ejecución del proyecto.

Figura 4-8: Ajuste del método al pronóstico del plazo final en los 10 meses de ejecución del proyecto Cardenillo. (a) Método EVM. (b) Metodología CTCR.

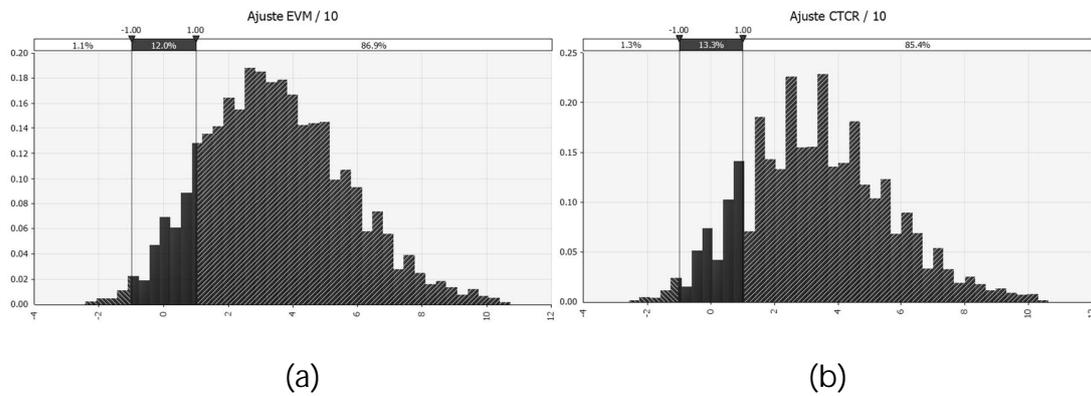
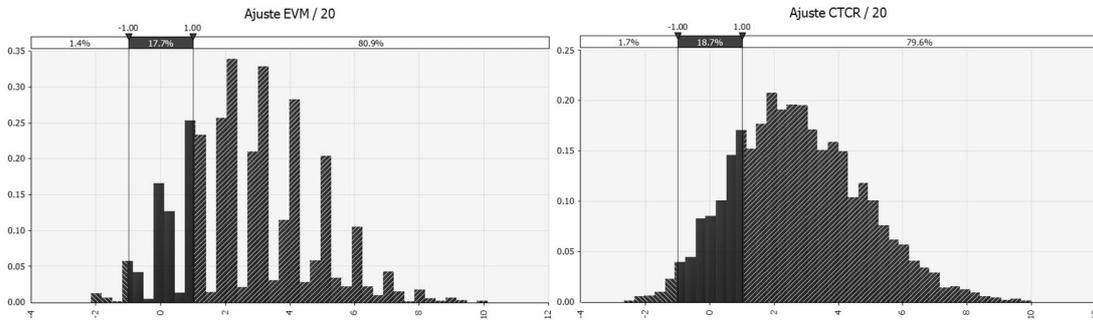


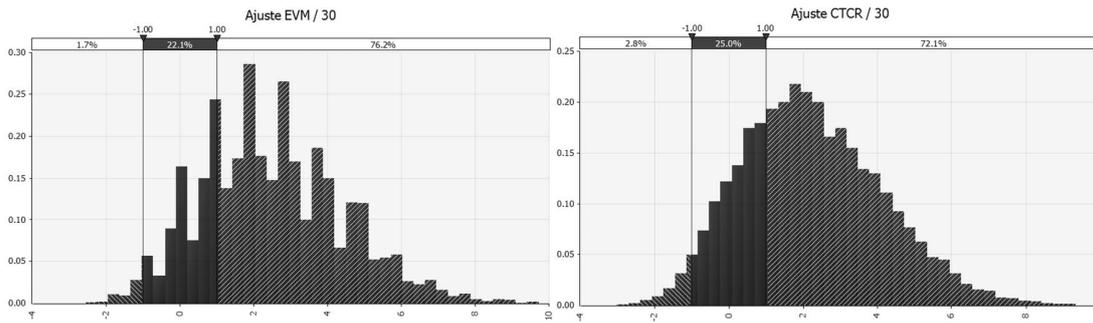
Figura 4-9: Ajuste del método al pronóstico del plazo final en los 20 meses de ejecución del proyecto Cardenillo. (a) Método EVM. (b) Metodología CTCR.



(a)

(b)

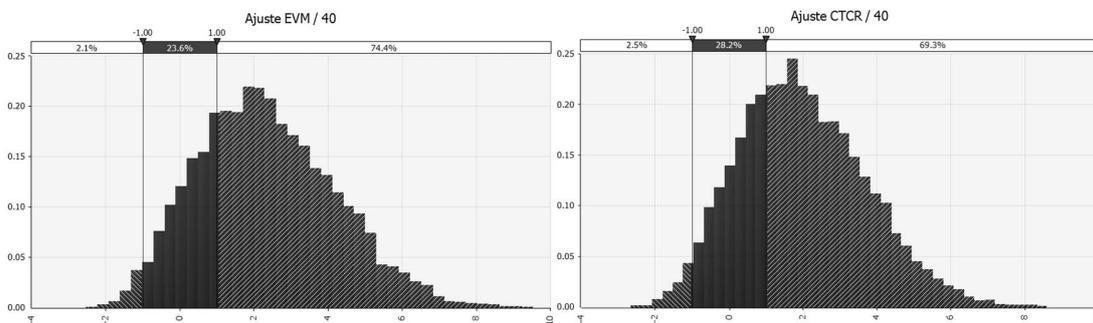
Figura 4-10: Ajuste del método al pronóstico del plazo final en los 30 meses de ejecución del proyecto Cardenillo. (a) Método EVM. (b) Metodología CTCR.



(a)

(b)

Figura 4-11: Ajuste del método al pronóstico del plazo final en los 40 meses de ejecución del proyecto Cardenillo. (a) Método EVM. (b) Metodología CTCR.



(a)

(b)

Figura 4-12: Ajuste del método al pronóstico del plazo final en los 50 meses de ejecución del proyecto Cardenillo. (a) Método EVM. (b) Metodología CTCR.

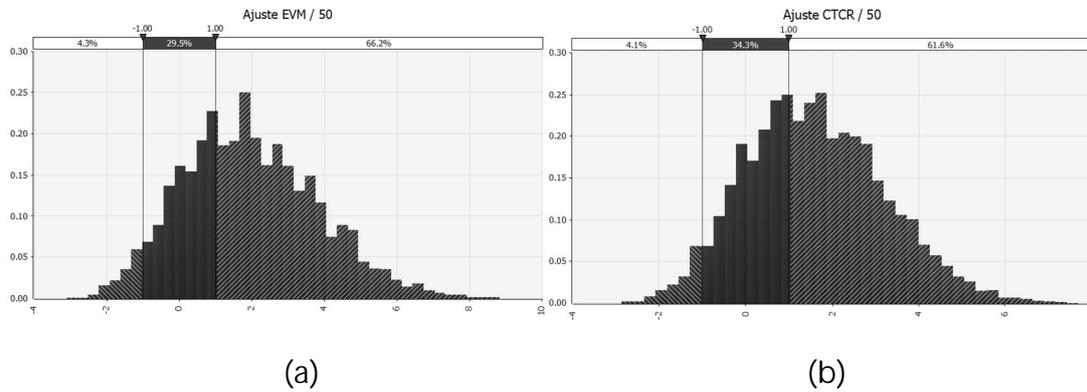
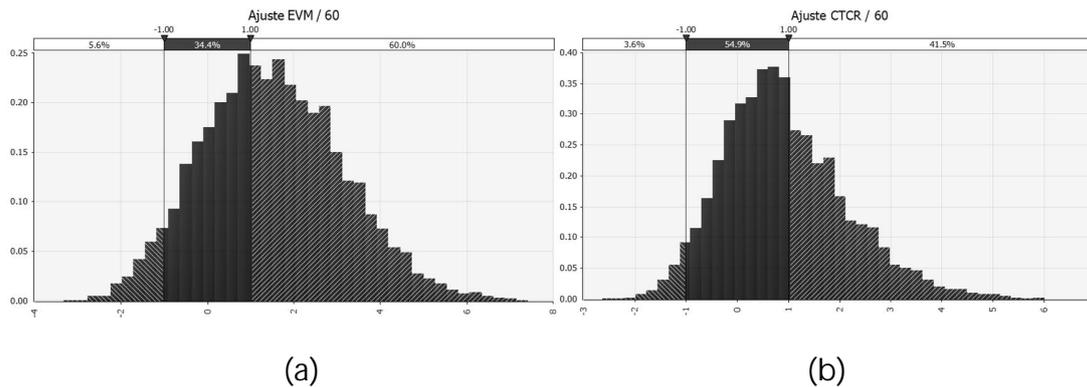


Figura 4-13: Ajuste del método al pronóstico del plazo final en los 60 meses de ejecución del proyecto Cardenillo. (a) Método EVM. (b) Metodología CTCR.



En la Figura 4-14 hasta la Figura 4-17, se presentan los histogramas de frecuencia con las probabilidades calculadas de ajuste del plazo de los métodos EVM y CTCR a la conclusión del proyecto, evaluadas a diferentes meses faltantes para la conclusión del proyecto. Para el proyecto hidroeléctrico Cardenillo se realizó el análisis en los meses 10, 8, 6 y 1 antes de la conclusión del proyecto según las simulaciones.

Figura 4-14: Ajuste del método al pronóstico del plazo final en el mes 10 antes de la conclusión del proyecto Cardenillo. (a) Método EVM. (b) Metodología CTRC.

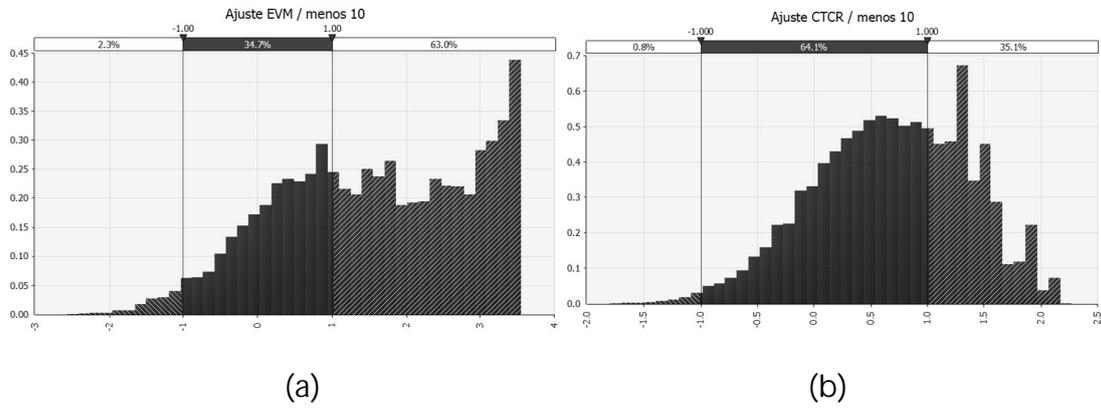


Figura 4-15: Ajuste del método al pronóstico del plazo final en el mes 8 antes de la conclusión del proyecto Cardenillo. (a) Método EVM. (b) Metodología CTRC

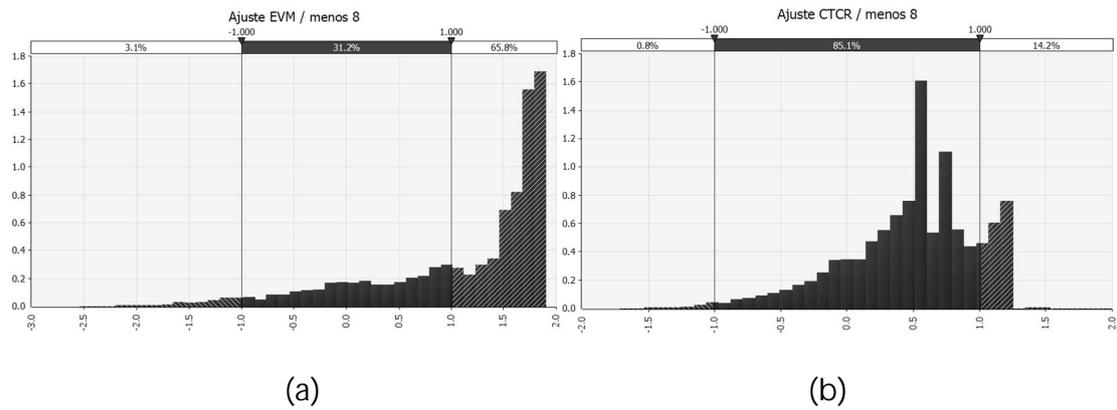


Figura 4-16: Ajuste del método al pronóstico del plazo final en el mes 6 antes de la conclusión del proyecto Cardenillo. (a) Método EVM. (b) Metodología CTRC

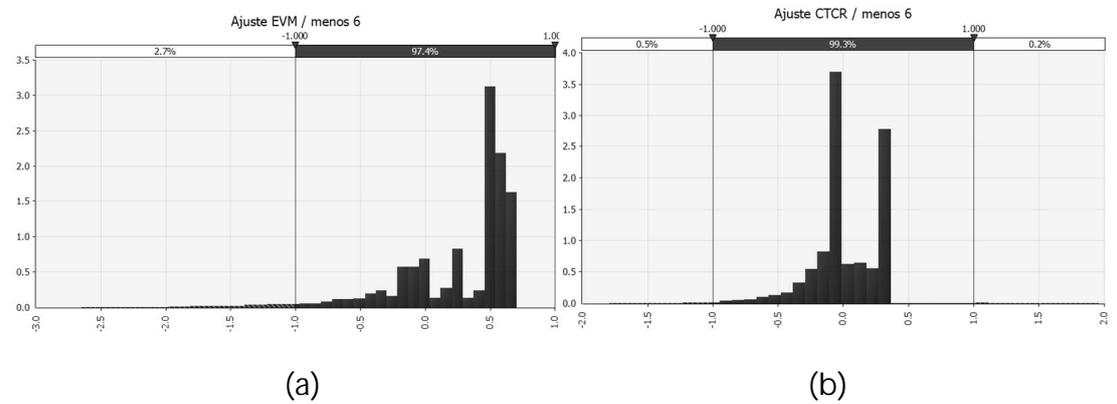
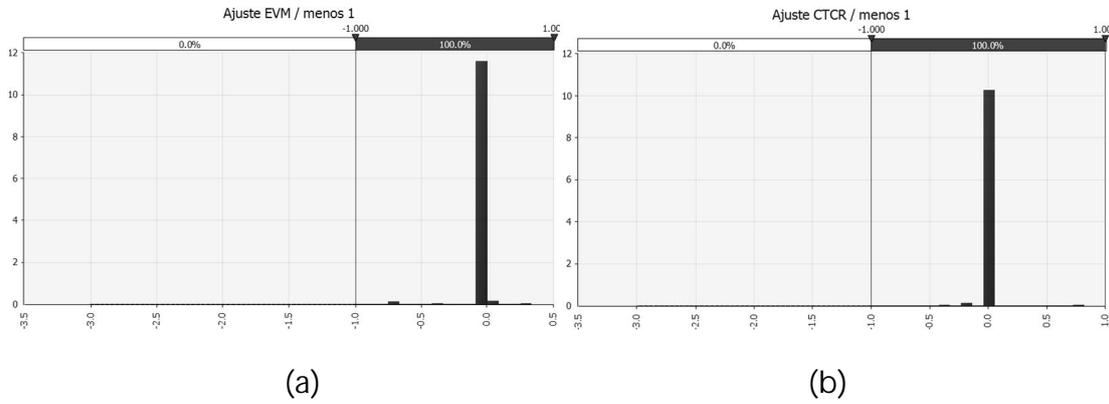
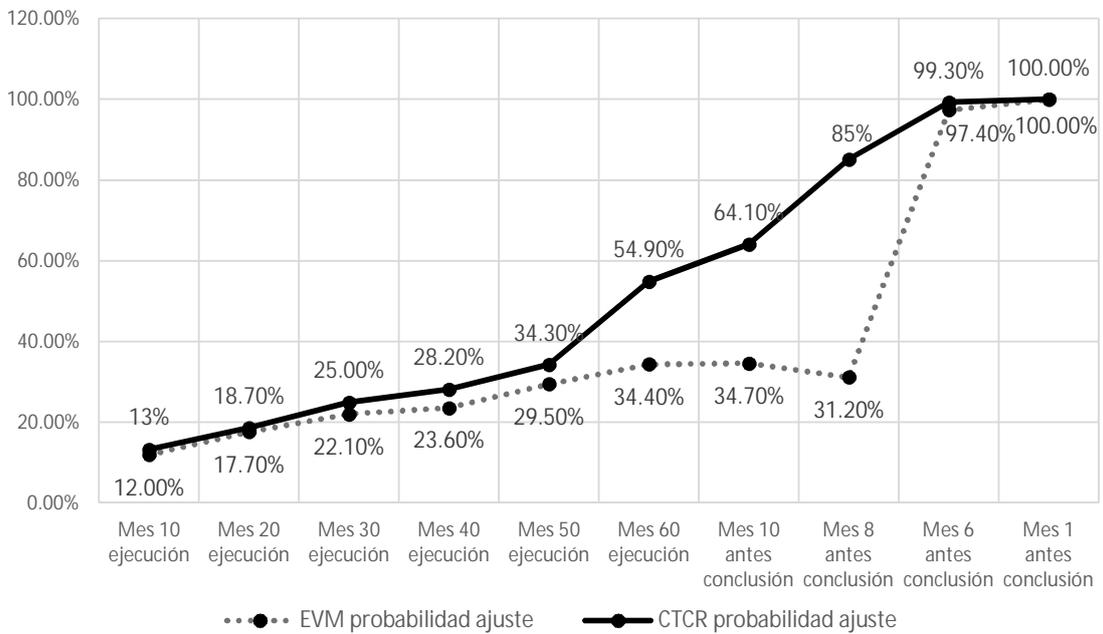


Figura 4-17: Ajuste del método al pronóstico del plazo final en el mes 1 antes de la conclusión del proyecto Cardenillo. (a) Método EVM. (b) Metodología CTCR



En la Figura 4-18 se presenta la evolución temporal de como los métodos EVM y CTCR se ajustan en sus pronósticos del tiempo final de conclusión del proyecto Cardenillo, de acuerdo a los 10,000 escenarios del modelo de simulación.

Figura 4-18: Evolución de La probabilidad de ajuste de los métodos EVM y CTCR al pronóstico del plazo final del proyecto hidroeléctrico Cardenillo



En la Figura 4-18 se evidencia que la metodología CTCR presenta desde los primeros meses de ejecución una probabilidad de ajuste mayor al método EVM, lo que indica que CTCR predice el plazo a la conclusión del proyecto Cardenillo con una mayor eficiencia que EVM. Se evidencia que en el mes 10 antes de la conclusión del proyecto CTCR tiene una probabilidad del 64.1% de predecir correctamente el plazo de la conclusión del proyecto, mientras que EVM alcanza en el mismo periodo apenas una probabilidad del 34.7%. De la misma forma, en el mes 6 previo a la conclusión, CTCR muestra una probabilidad del 99.3% frente al 97.4% de EVM.

#### 4.5.2 Resultados de la simulación para el proyecto hidroeléctrico Mazar Dudas

El modelo de simulación del proyecto hidroeléctrico Mazar Dudas, utilizó los siguientes datos de entrada:

- 205 actividades del cronograma maestro
- 30 actividades resumen del cronograma
- Plazo total planificado de 27 meses
- Costo total planificado de US\$ 56.55 millones
- 10 000 iteraciones
- Software @Risk
- Variables de entrada: costos y plazos de actividades
- Variables de salida: costo y plazos de simulación

##### Simulación de costos totales

Los resultados obtenidos en la simulación de los costos totales del proyecto hidroeléctrico Mazar Dudas se presentan en las Figura 4-19 y Figura 4-20. Los resultados concluyen demostrando que la probabilidad de alcanzar el costo

inicial planificado de US\$ 56.55 millones es del 20.0% (Figura 4-19), mientras que con una probabilidad del 95% el costo del proyecto alcanzaría los US\$ 59.35 millones (Figura 4-20).

Figura 4-19: Histograma de costos totales del proyecto Mazar Dudas con una probabilidad al costo planificado inicial

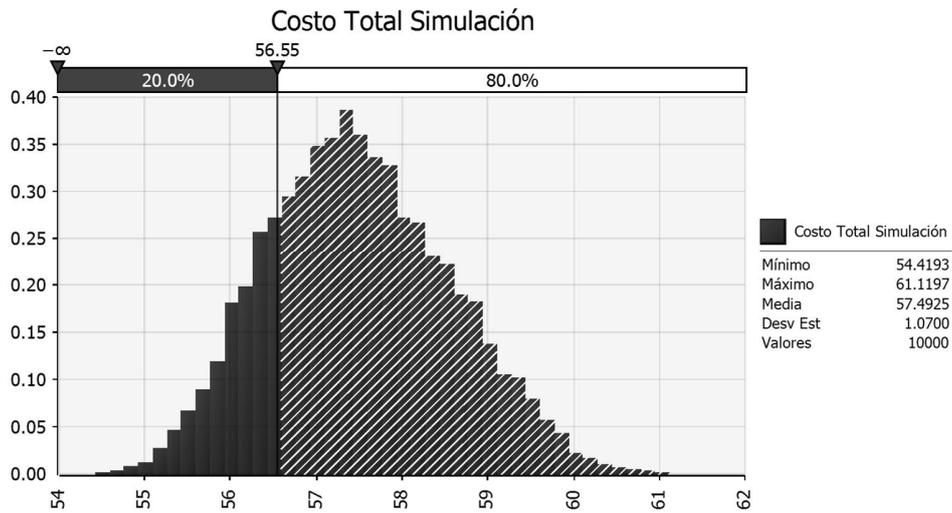
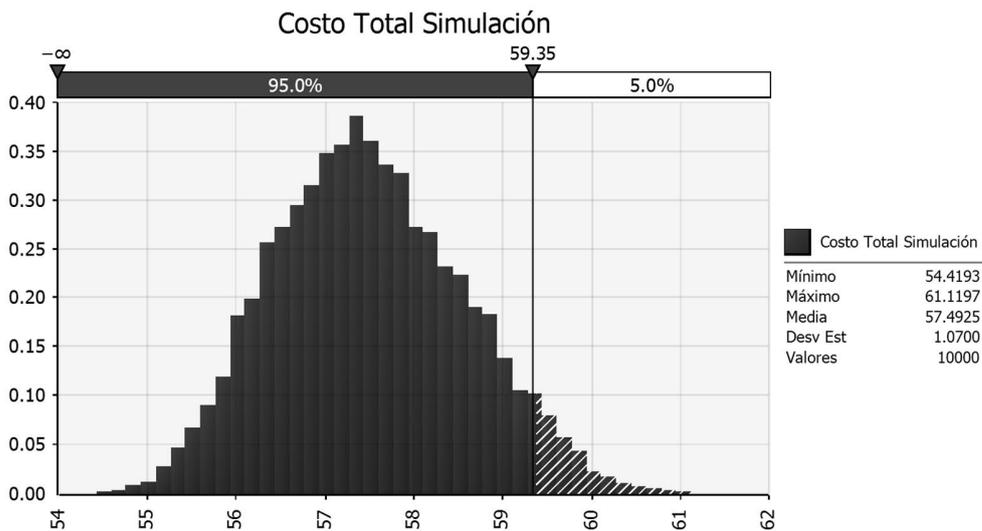


Figura 4-20: Histograma de costos totales del proyecto Mazar Dudas con una probabilidad del 95%



Simulación de plazos totales

En las Figura 4-21 y Figura 4-22 se presentan los resultados obtenidos en la simulación de los plazos totales del modelo del proyecto hidroeléctrico Mazar Dudas. Los resultados indican que la probabilidad de terminar dentro del plazo planificado de 27 meses es de apenas el 7.7% (Figura 4-21), mientras que con una probabilidad del 95% el plazo final alcanzaría los 32 meses (Figura 4-22).

Figura 4-21: Histograma de plazos totales del proyecto Mazar Dudas con una probabilidad al plazo planificado inicial

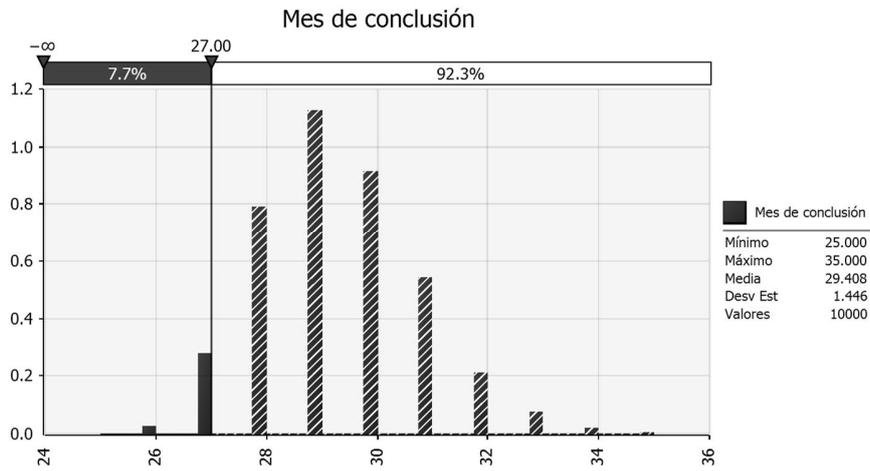
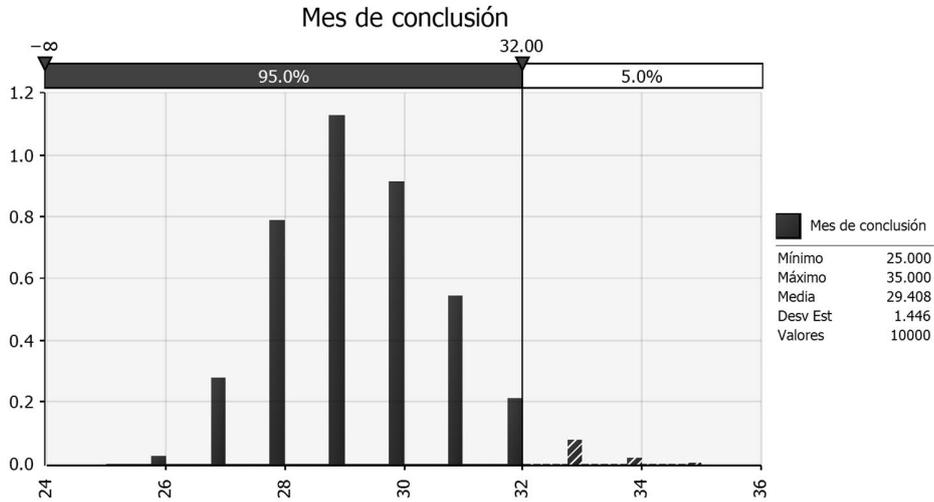


Figura 4-22: Histograma del plazo total del proyecto Mazar Dudas con una probabilidad del 95%



### Simulación de ajuste de costos

Para el pronóstico del costo a la conclusión del proyecto de Mazar Dudas, aplicando CTCR basado en EVM, se tienen como resultado probabilidades que reflejan un incremento de ajuste, lo dicho se aprecia en la Tabla 4-25. En el mes 5 de ejecución se obtuvo una probabilidad del 71.00% de que el costo pronosticado se ajuste al costo de la simulación, mientras que en el mes 15 de ejecución, existe una probabilidad del 99.80%, y en los meses siguientes se mantiene una probabilidad del 100% hasta la conclusión. Las probabilidades calculadas se basaron en un rango del 2% del monto total planificado ( $\pm$  US\$ 0.6 millones).

Tabla 4-25: Probabilidades de ajuste en el pronóstico del costo para el proyecto Mazar Dudas

Periodo de análisis	Earned Value EV	Probabilidad de ajuste de costos (%)
[meses]	[millones] [Prob. 95%]	[rank 2% ± 0.6 millones]
5	10.85	71.00
10	24.75	94.20
15	40.51	99.80
20	52.19	100.00
25	56.41	100.00
27	56.50	100.00
Conclusión	56.55	100.00

### Simulación de ajuste de plazos

Aplicando las metodologías EVM y CTCR en cada uno de los 10,000 escenarios, se realizaron los pronósticos del plazo a la conclusión del proyecto Mazar Dudas en diferentes meses de avance del proyecto. La base de datos generada con todas las simulaciones permitieron, a través del software @Risk, calcular la probabilidad de cada uno de los métodos en pronosticar adecuadamente el plazo de finalización en cada escenario. Se dio un rango de error de  $\pm 1$  mes.

En la Figura 4-23 a la Figura 4-25 se presentan los histogramas de frecuencia con las probabilidades calculadas de ajuste del plazo de los métodos EVM y CTCR a la conclusión del proyecto, evaluadas a diferentes meses de iniciada la ejecución del proyecto. Para el proyecto Mazar Dudas se realizó el análisis en los meses 5, 10 y 15 de ejecución del proyecto.

Figura 4-23: Ajuste del método al pronóstico del plazo final en los 5 meses de ejecución del proyecto Mazar Dudas. (a) Método EVM. (b) Metodología CTCR.

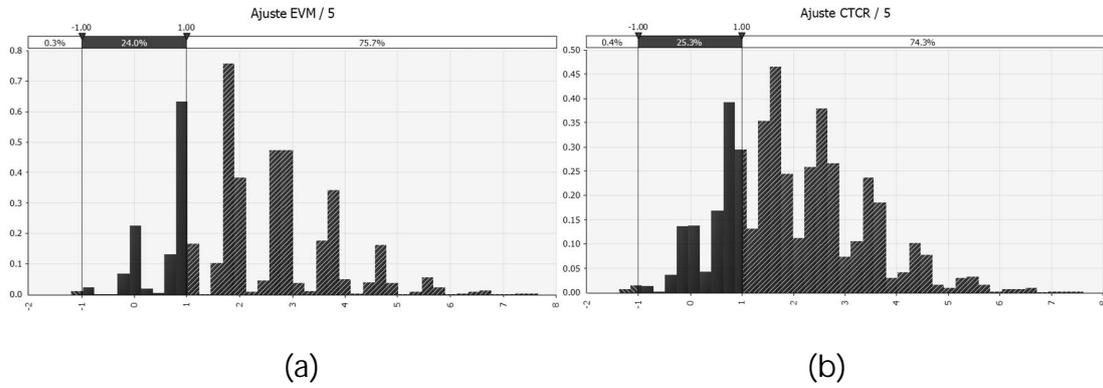


Figura 4-24: Ajuste del método al pronóstico del plazo final en los 10 meses de ejecución del proyecto Mazar Dudas. (a) Método EVM. (b) Metodología CTCR.

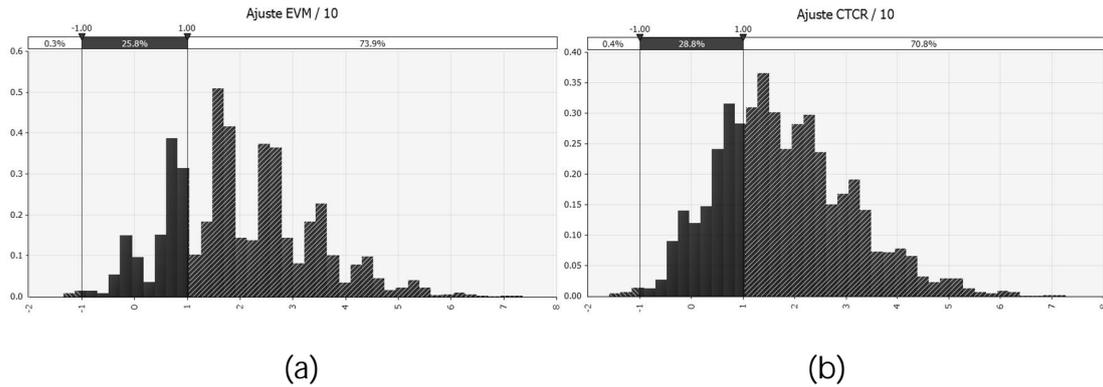
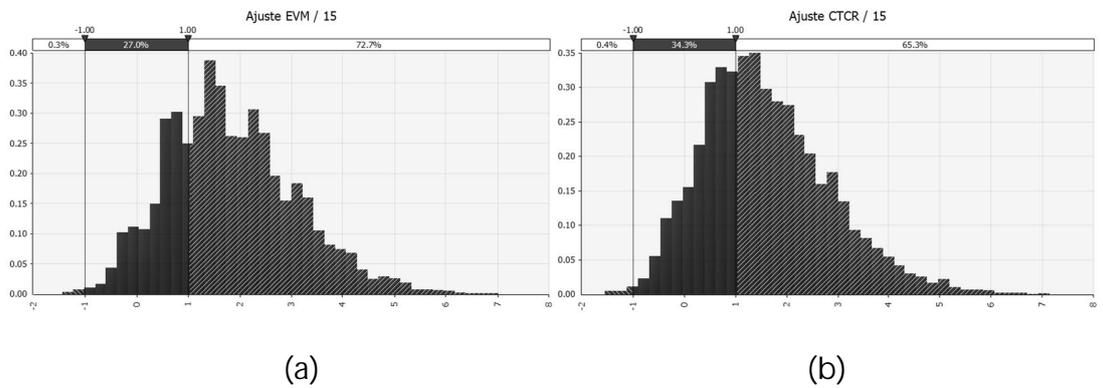


Figura 4-25: Ajuste del método al pronóstico del plazo final en los 15 meses de ejecución del proyecto Mazar Dudas. (a) Método EVM. (b) Metodología CTCR.



En la Figura 4-26 hasta la Figura 4-29 se presentan los histogramas de frecuencia con las probabilidades calculadas de ajuste del plazo de los métodos EVM y CTCR a la conclusión del proyecto, evaluadas a diferentes meses faltantes para la conclusión. Para el proyecto Mazar Dudas se realizó el análisis en los meses 10, 8, 6 y 1 antes de la conclusión del proyecto según las simulaciones.

Figura 4-26: Ajuste del método al pronóstico del plazo final en el mes 10 antes de la conclusión del proyecto Mazar Dudas. (a) Método EVM. (b) Metodología CTCR

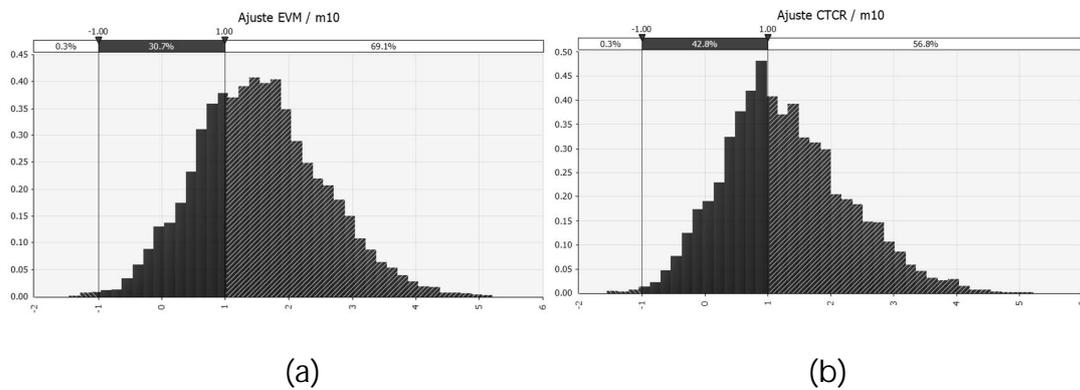


Figura 4-27: Ajuste del método al pronóstico del plazo final en el mes 8 antes de la conclusión del proyecto Mazar Dudas. (a) Método EVM. (b) Metodología CTCR

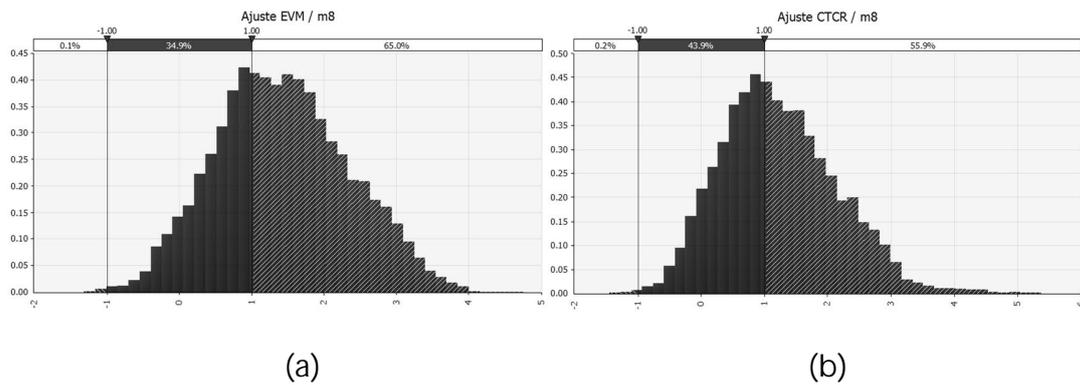


Figura 4-28: Ajuste del método al pronóstico del plazo final en el mes 6 antes de la conclusión del proyecto Mazar Dudas. (a) Método EVM. (b) Metodología CTCR

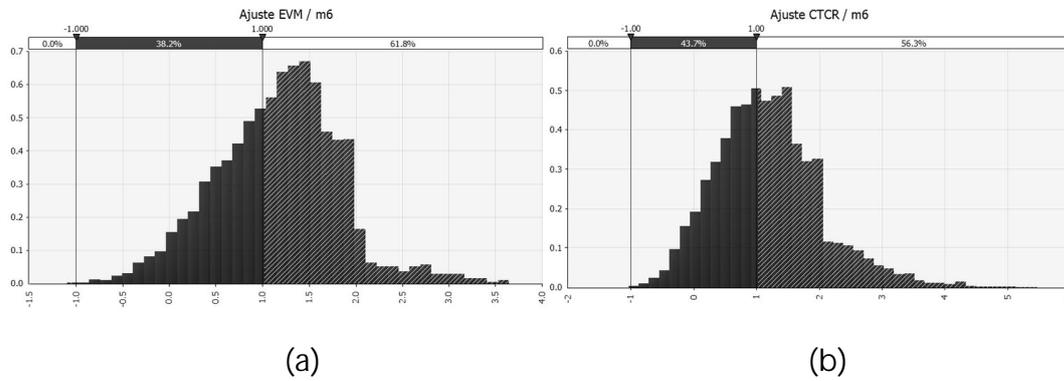
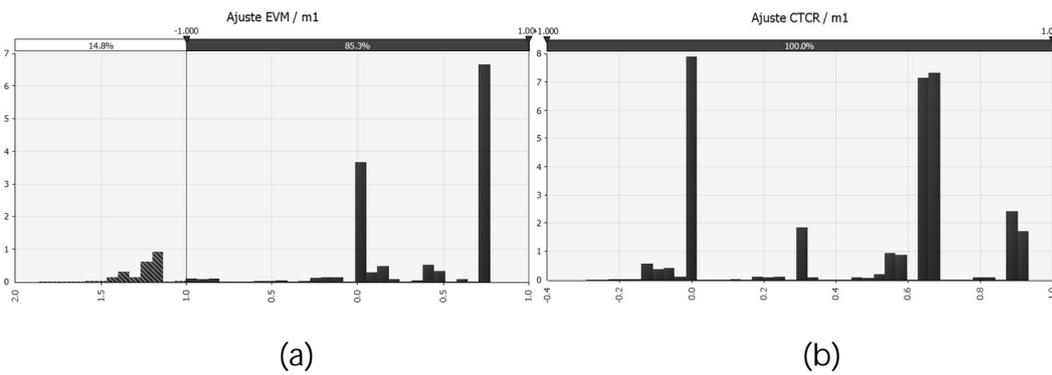
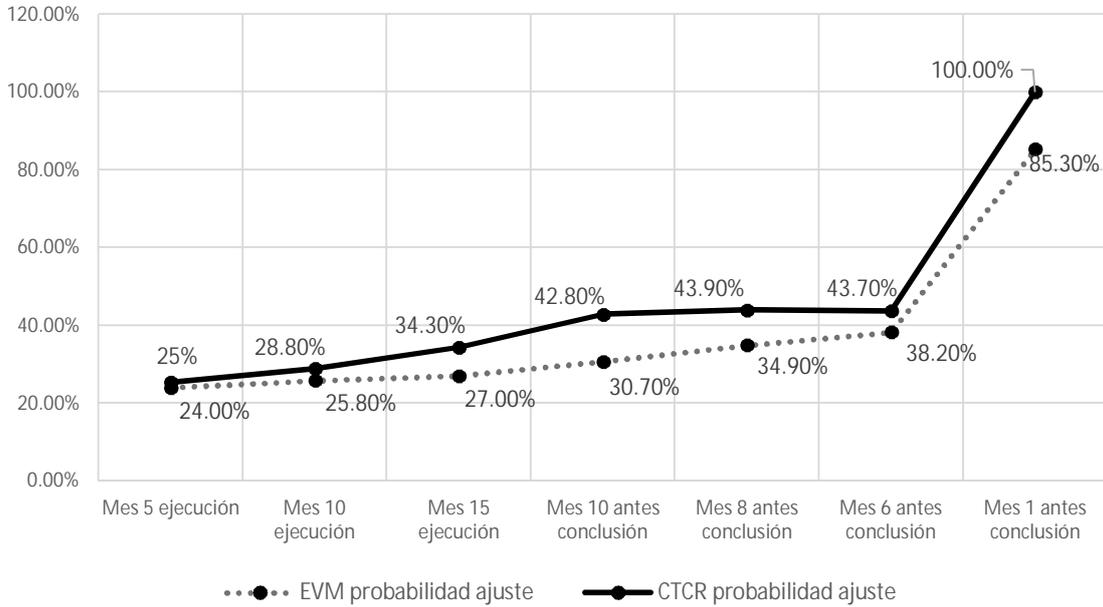


Figura 4-29: Ajuste del método al pronóstico del plazo final en el mes 1 antes de la conclusión del proyecto Mazar Dudas. (a) Método EVM. (b) Metodología CTCR



En la Figura 4-30 se presenta la evolución de los métodos EVM y CTCR, indicando el ajuste del pronóstico del tiempo final de conclusión del proyecto Mazar Dudas, de acuerdo a los 10,000 escenarios del modelo de simulación.

Figura 4-30: Evolución de La probabilidad de ajuste de los métodos EVM y CTCR al pronóstico del plazo final del proyecto hidroeléctrico Mazar Dudas



Al igual que el resultado obtenido en el caso de estudio anterior correspondiente al proyecto hidroeléctrico Cardenillo, en la Figura 4-30 se evidencia para el proyecto Mazar Dudas, que la metodología CTCR presenta desde los primeros meses de ejecución una probabilidad de ajuste mayor al método EVM, lo que indica que CTCR predice el plazo a la conclusión del proyecto Mazar Dudas con una mayor eficiencia que EVM. Se evidencia que en el mes 10 antes de la conclusión del proyecto CTCR tiene una probabilidad del 42.8% de predecir correctamente el plazo de la conclusión del proyecto, mientras que EVM alcanza en el mismo periodo apenas una probabilidad del 30.7%. De la misma forma, en el mes 6 previo a la conclusión, CTCR muestra una probabilidad del 43.7% frente al 38.2% de EVM.

### 4.5.3 Resultados de simulación para el proyecto hidroeléctrico Sopladora

El modelo estocástico del proyecto hidroeléctrico Sopladora utilizó los siguientes datos:

- 552 actividades del cronograma maestro
- 30 actividades resumen del cronograma
- Plazo total planificado de 47 meses
- Costo total planificado de US\$ 678.04 millones
- 10 000 iteraciones
- Software @Risk
- Variables de entrada: costos y plazos de actividades
- Variables de salida: costo y plazos de simulación

#### Simulación de costos totales

Los resultados obtenidos en la simulación de los costos totales del proyecto hidroeléctrico Sopladora se presentan en la Figura 4-31 y Figura 4-32 los resultados indican que la probabilidad de que el proyecto alcance el costo inicial planificado de US\$ 678 millones es de 23.6% (Figura 4-31), mientras que con una probabilidad del 95% el costo alcanzaría los US\$ 714 millones (Figura 4-32).

Figura 4-31: Histograma de costos totales del proyecto hidroeléctrico Sopladora, con una probabilidad al costo planificado inicial

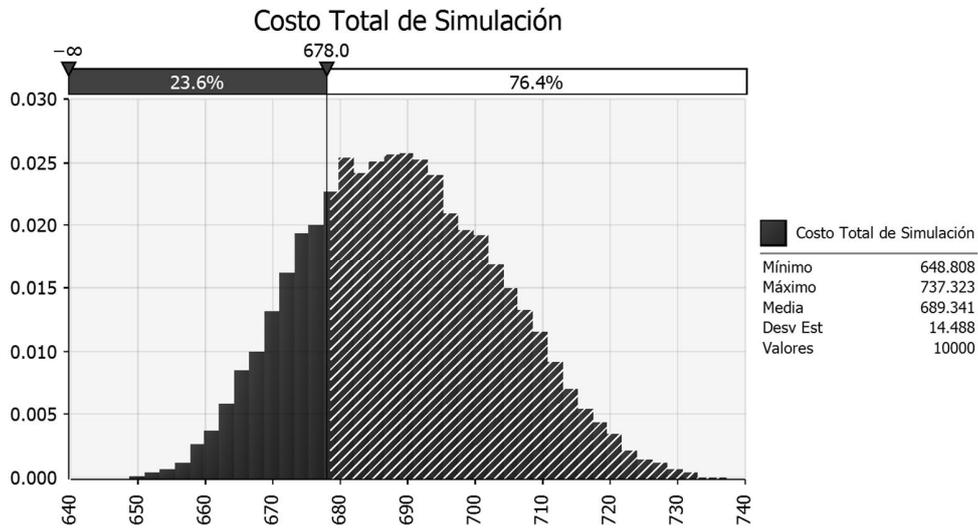
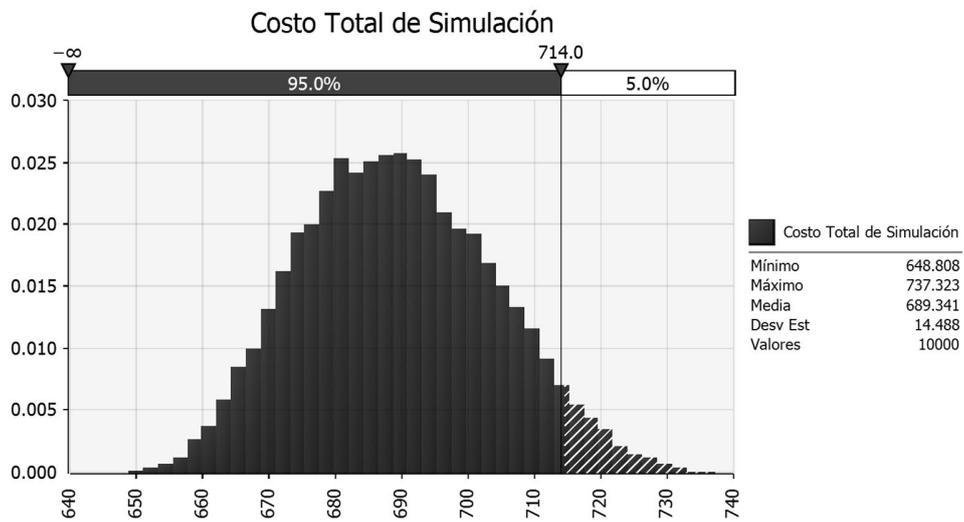


Figura 4-32: Histograma de costos totales del proyecto hidroeléctrico Sopladora, con una probabilidad del 95%



### Simulación de plazos totales

Los resultados obtenidos en la simulación de los plazos totales del proyecto hidroeléctrico Sopladora se presentan en la Figura 4-33 y Figura 4-34 los

resultados indican que la probabilidad de que el proyecto termine dentro del plazo planificado de 47 meses es de 5.5% (Figura 4-33), mientras que con una probabilidad del 95% el plazo final alcanzaría los 55 meses (Figura 4-34).

Figura 4-33: Histograma de plazos totales del proyecto hidroeléctrico Sopladora, con una probabilidad al plazo planificado inicial

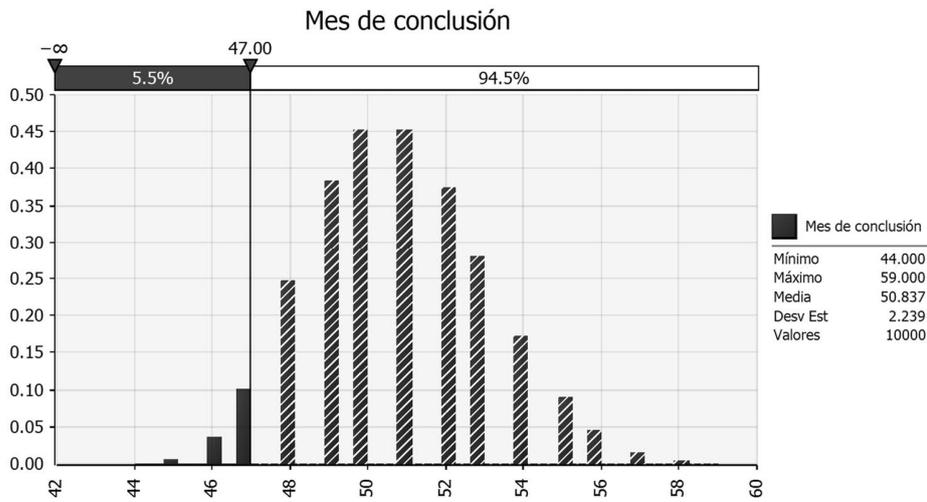
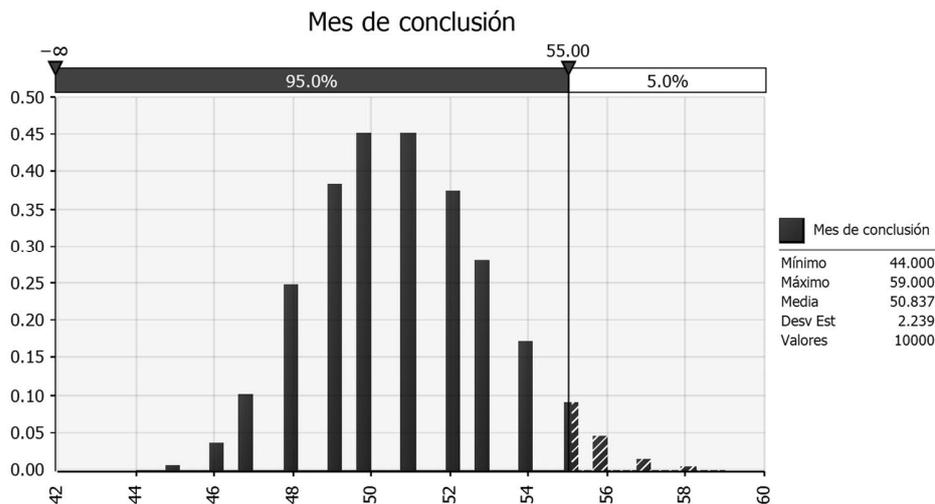


Figura 4-34: Histograma del plazo total del proyecto hidroeléctrico Sopladora, con una probabilidad del 95%



Simulación de ajuste de costos

De los resultados presentados en la Tabla 4-26 se desprende que el pronóstico del costo a la conclusión del proyecto Sopladora presenta probabilidades que reflejan un incremento de ajuste a lo largo del tiempo. En el mes 5 de ejecución se obtuvo una probabilidad del 64.30%, mientras que en el mes 30 de ejecución, existe una probabilidad del 97.80%. En los meses siguientes se mantiene una probabilidad del 100% hasta la conclusión. Las probabilidades calculadas se basaron en un rango del 2% del monto total planificado ( $\pm$  US\$ 6.8 millones).

Tabla 4-26: Probabilidades de ajuste en el pronóstico del costo para el proyecto Sopladora

Periodo de análisis	Earned Value EV	Probabilidad de ajuste del Costo (%)
[meses]	[millones] [Prob. 95%]	[rank 2% $\pm$ 6.8 millones]
5	102.78	64.30
10	212.74	76.00
15	310.30	87.80
20	407.50	93.20
25	502.90	95.90
30	577.70	97.80
35	621.20	100.00
40	656.30	100.00
45	676.00	100.00
47	678.00	100.00
Conclusión	678.04	100.00

Simulación de ajuste de plazos

Aplicando las metodologías EVM y CTCR en cada uno de los 10,000 escenarios, se realizaron los pronósticos del plazo a la conclusión del proyecto en diferentes meses de avance del proyecto. La base de datos generada con todas las simulaciones permitieron, a través del software @Risk, calcular la probabilidad de cada uno de los métodos en pronosticar adecuadamente el plazo de finalización en cada escenario. Se dio un rango de error de  $\pm 1$  mes.

En la Figura 4-35 hasta la Figura 4-38 se presentan los histogramas de frecuencia con las probabilidades calculadas de ajuste del plazo de los métodos EVM y CTCR a la conclusión del proyecto, evaluadas a diferentes meses de iniciada la ejecución del proyecto. Para el proyecto Sopladora se realizó el análisis en los meses 10, 20, 30 y 35 de ejecución del proyecto.

Figura 4-35: Ajuste del método al pronóstico del plazo final en los 10 meses de ejecución del proyecto Sopladora. (a) Método EVM. (b) Metodología CTCR

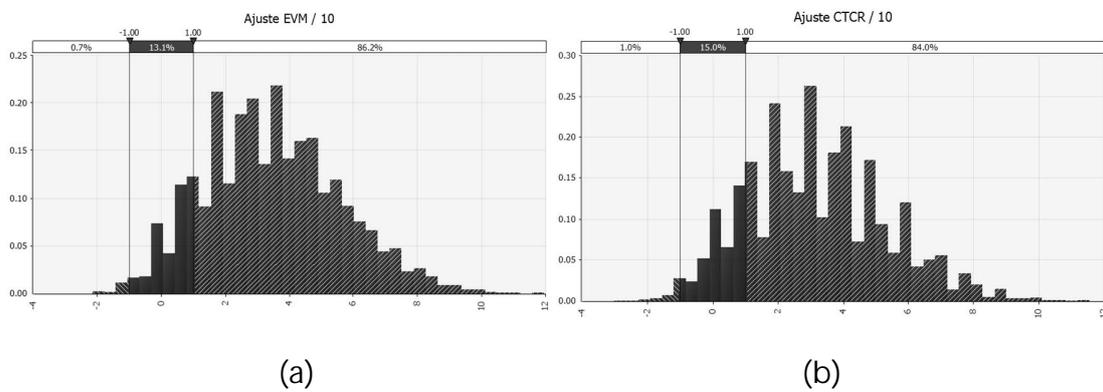


Figura 4-36: Ajuste del método al pronóstico del plazo final en los 20 meses de ejecución del proyecto Sopladora. (a) Método EVM. (b) Metodología CTCR

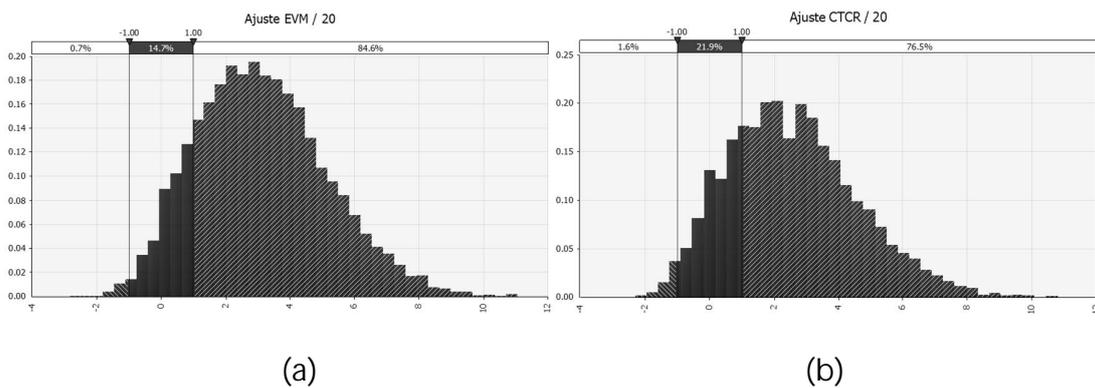


Figura 4-37: Ajuste del método al pronóstico del plazo final en los 30 meses de ejecución del proyecto Sopladora. (a) Método EVM. (b) Metodología CTCR

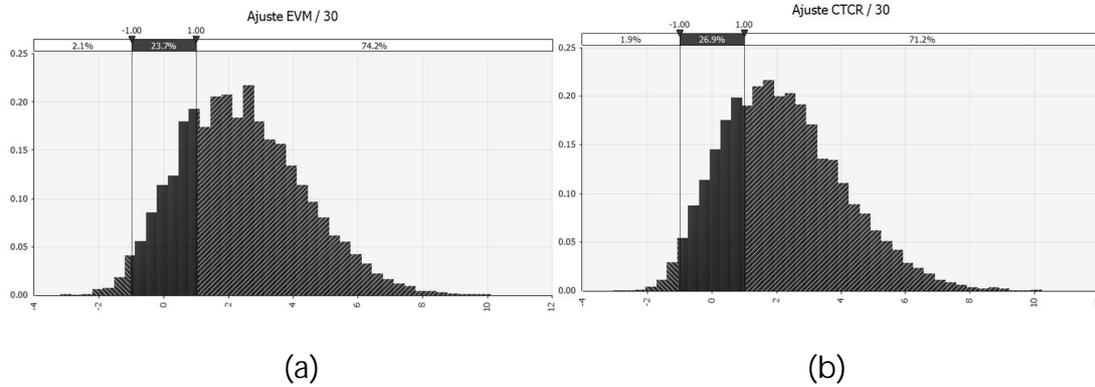
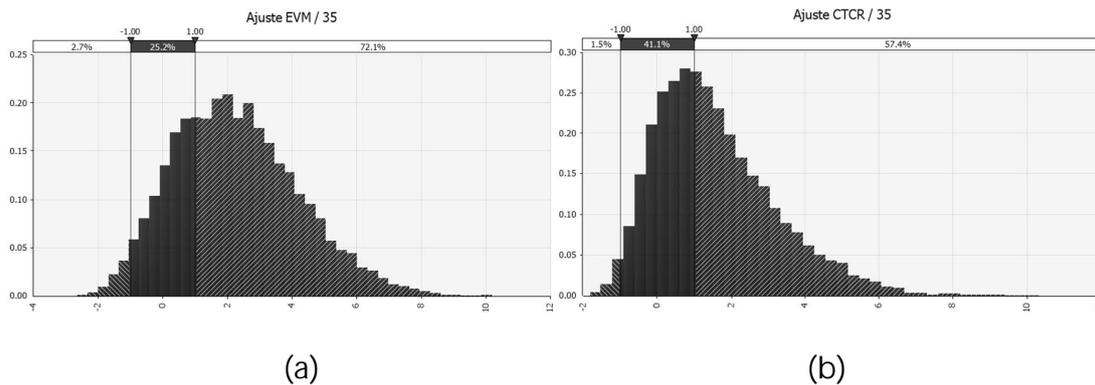


Figura 4-38: Ajuste del método al pronóstico del plazo final en los 35 meses de ejecución del proyecto Sopladora. (a) Método EVM. (b) Metodología CTCR



En la Figura 4-39 hasta la Figura 4-42 se presentan los histogramas de frecuencia con las probabilidades calculadas de ajuste del plazo de los métodos EVM y CTCR a la conclusión del proyecto, evaluadas a diferentes meses faltantes para la conclusión del proyecto. Para el proyecto Sopladora se realizó el análisis en los meses 10, 8, 5 y 1 antes de la conclusión del proyecto según las simulaciones.

Figura 4-39: Ajuste del método al pronóstico del plazo final en el mes 10 antes de la conclusión del proyecto Sopladora. (a) Método EVM. (b) Metodología CTCR

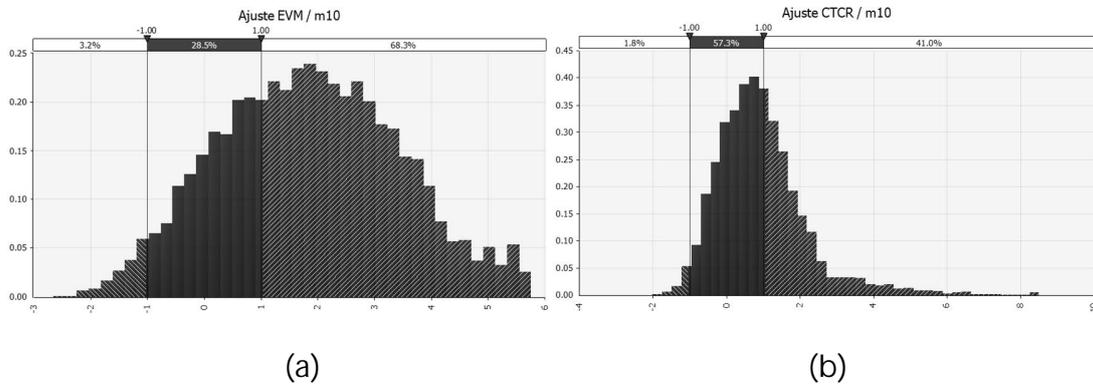


Figura 4-40: Ajuste del método al pronóstico del plazo final en el mes 8 antes de la conclusión del proyecto Sopladora. (a) Método EVM. (b) Metodología CTCR

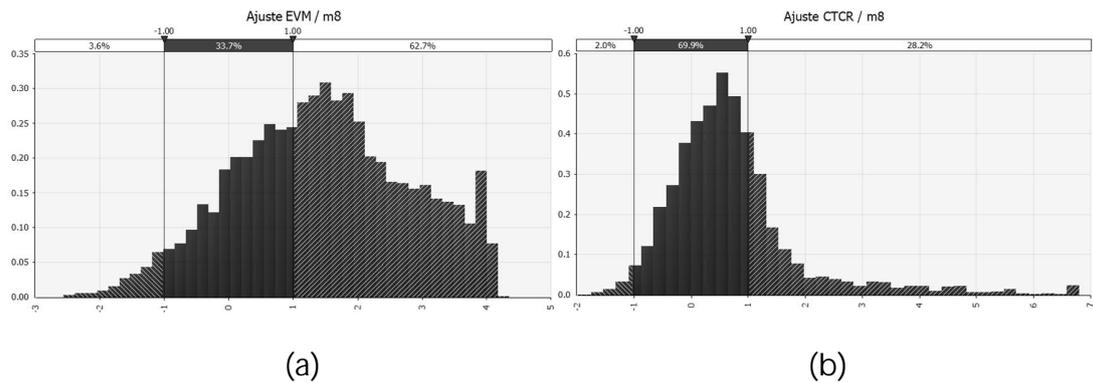


Figura 4-41: Ajuste del método al pronóstico del plazo final en el mes 5 antes de la conclusión del proyecto Sopladora. (a) Método EVM. (b) Metodología CTCR

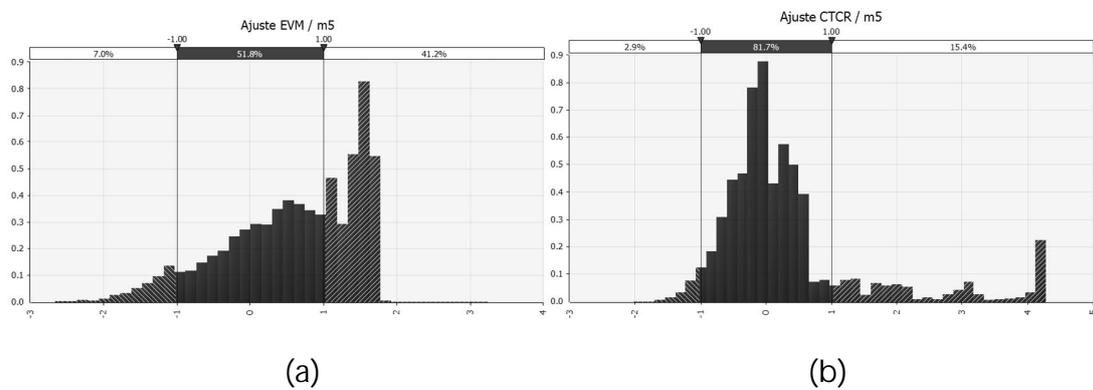
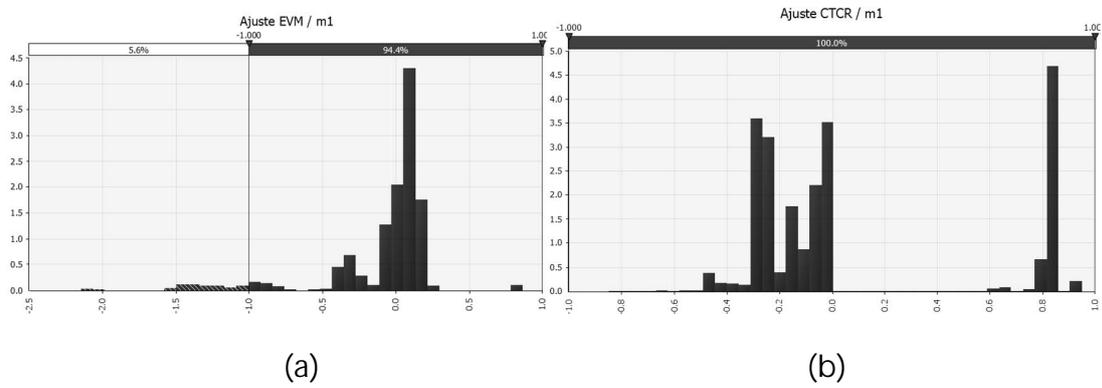
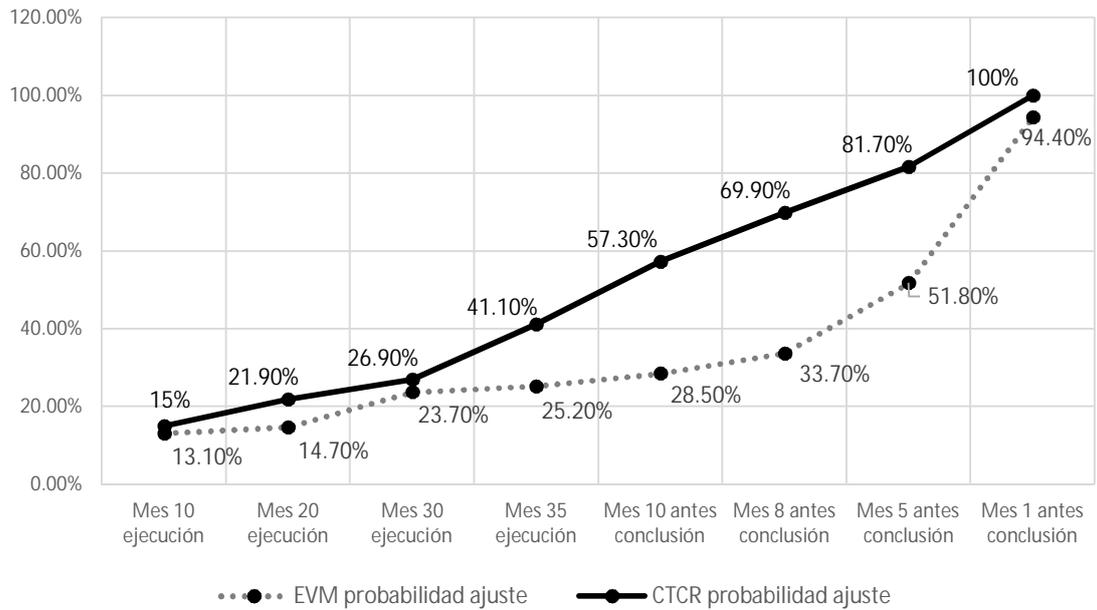


Figura 4-42: Ajuste del método al pronóstico del plazo final en el mes 1 antes de la conclusión del proyecto Sopladora. (a) Método EVM. (b) Metodología CTCR



En la Figura 4-43 se presenta, para los métodos EVM y CTCR, la evolución de ajuste del pronóstico del tiempo final de conclusión del proyecto hidroeléctrico Sopladora, de acuerdo a los 10,000 escenarios aplicados en el modelo de simulación.

Figura 4-43: Evolución de La probabilidad de ajuste de los métodos EVM y CTCR al pronóstico del plazo final del proyecto hidroeléctrico Sopladora



Siguiendo con la tendencia obtenida en los casos de estudio anteriores, en la Figura 4-43 se evidencia que la metodología CTCR presenta desde los primeros meses de ejecución una probabilidad de ajuste mayor al método EVM, lo que indica que CTCR predice el plazo a la conclusión del proyecto Sopladora con una mayor eficiencia que EVM. Se evidencia que en el mes 10 antes de la conclusión del proyecto CTCR tiene una probabilidad del 57.3% de predecir correctamente el plazo de la conclusión del proyecto, mientras que EVM alcanza en el mismo periodo apenas una probabilidad del 28.5%. De la misma forma, en el mes 5 previo a la conclusión, CTCR muestra una probabilidad del 81.7% frente al 51.8% de EVM.

#### 4.5.4 Resultados de simulación para el proyecto hidroeléctrico Santiago

Datos de entrada del modelo del proyecto hidroeléctrico Santiago:

- 797 actividades del cronograma maestro
- 29 actividades resumen del cronograma
- Plazo total planificado de 68 meses
- Costo total planificado de US\$ 2684.32 millones
- 10 000 iteraciones
- Software @Risk
- Variables de entrada: costos y plazos de actividades
- Variables de salida: costo y plazos de simulación

#### Simulación de costos totales

Los resultados obtenidos en la simulación de los costos totales del proyecto hidroeléctrico Santiago se presentan en la Figura 4-44 y Figura 4-45 los resultados

indican que la probabilidad de que el proyecto alcance el costo inicial planificado de US\$ 2,684.3 millones es de 26.4% (Figura 4-44), mientras que con una probabilidad del 95% el costo alcanzará los US\$ 2,839.0 millones (Figura 4-45).

Figura 4-44: Histograma de costos totales del proyecto Santiago con una probabilidad al costo planificado inicial

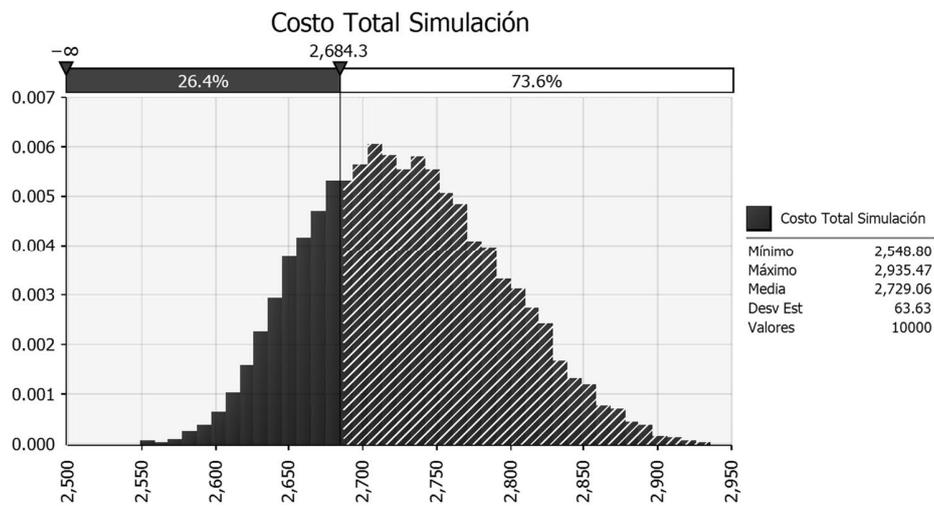
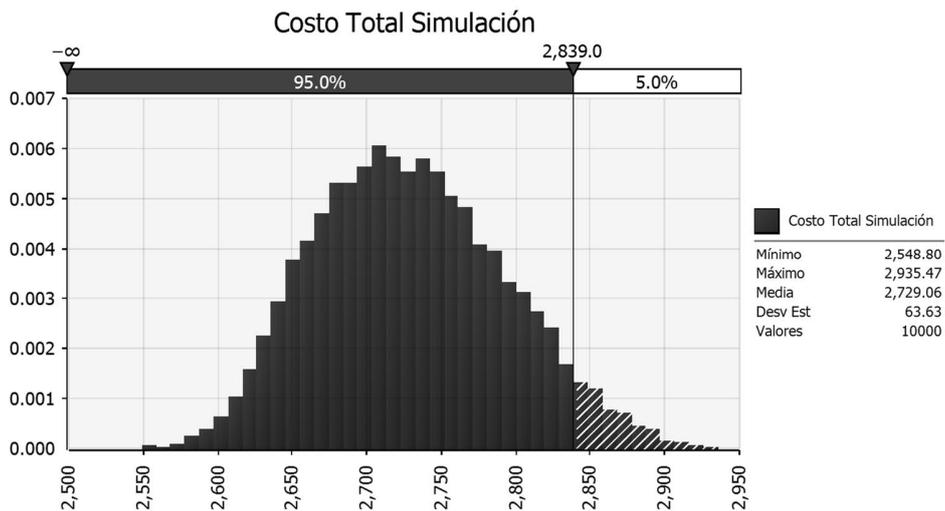


Figura 4-45: Histograma de costos totales del proyecto Santiago con una probabilidad del 95%



## Simulación de plazos totales

Los resultados obtenidos en la simulación de los plazos totales del proyecto hidroeléctrico Santiago se presentan en la Figura 4-46 y Figura 4-47 los resultados indican que la probabilidad de que el proyecto termine dentro del plazo planificado de 68 meses es de 6.8% (Figura 4-46), mientras que con una probabilidad del 95% el plazo final alcanzará los 78 meses (Figura 4-47).

Figura 4-46: Histograma de plazos totales del proyecto Santiago con una probabilidad al plazo planificado inicial

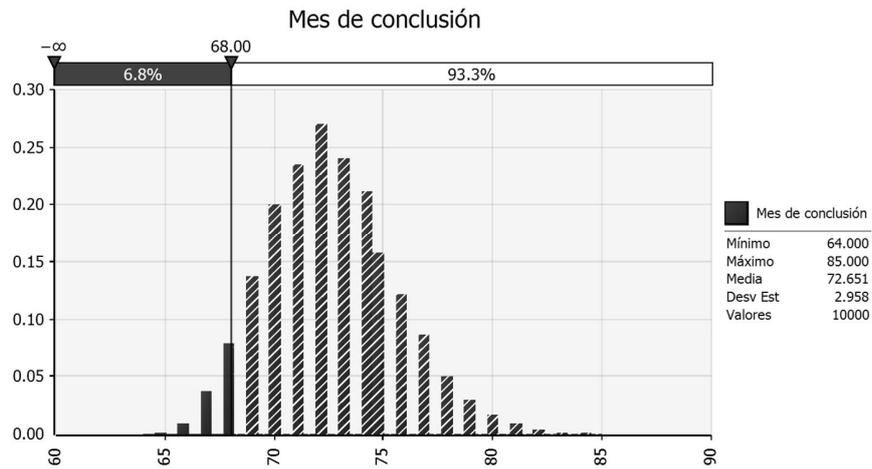
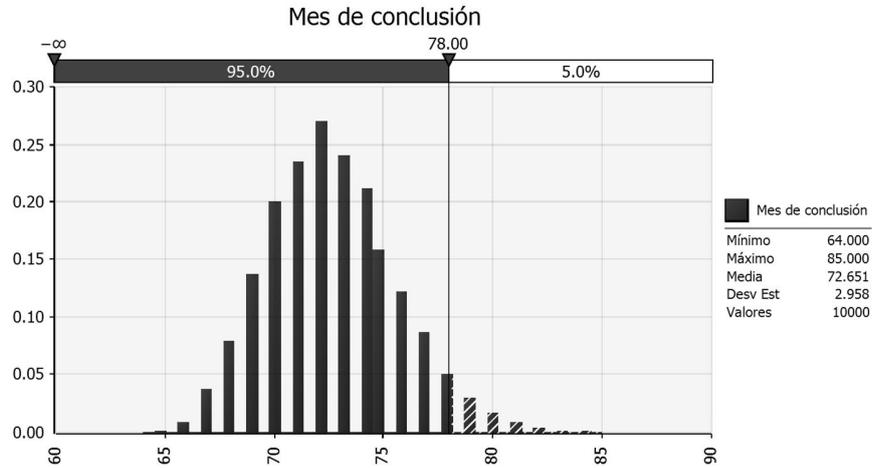


Figura 4-47: Histograma de costos totales del proyecto Santiago con una probabilidad del 95%



### Simulación de ajuste de costos

Respecto al pronóstico del costo a la conclusión del proyecto Santiago, se obtuvieron probabilidades que reflejan un incremento del ajuste o eficiencia de la metodología en los diferentes periodos de tiempo analizados. Esta situación queda reflejada en la Tabla 4-27. En el mes 5 de ejecución se obtuvo una probabilidad del 23.00% de que el costo pronosticado se ajuste al costo de la simulación, mientras que en el mes 45 de ejecución existe una probabilidad del 99.50% y en los meses siguientes se mantiene una probabilidad del 100% hasta la conclusión. Las probabilidades calculadas se basaron en un rango del 2% del monto total planificado ( $\pm$  US\$ 26.8 millones).

Tabla 4-27: Probabilidades de ajuste en el pronóstico del costo para el proyecto Santiago

Periodo de análisis	Earned Value EV	Probabilidad de ajuste del Costo (%)
[meses]	[millones] [Prob. 95%]	[rank 2% ± 26.8 millones]
5	299.00	23.00
10	685.70	28.30
15	1204.90	38.90
20	1613.90	43.20
25	1859.90	55.60
30	2055.70	72.00
35	2215.60	86.20
40	2356.20	96.20
45	2476.60	99.50
50	2528.90	100.00
55	2570.30	100.00
60	2607.10	100.00
65	2653.00	100.00
68	2678.00	100.00
Conclusión	2684.32	100.00

### Simulación de ajuste de plazos

Aplicando las metodologías EVM y CTCR en cada uno de los 10,000 escenarios, se realizaron los pronósticos del plazo a la conclusión del proyecto en diferentes meses de avance del proyecto. Se toma un rango de error de  $\pm 1$  mes.

En la Figura 4-48 hasta la Figura 4-53 se presentan los histogramas de frecuencia con las probabilidades calculadas de ajuste del plazo de los métodos EVM y CTCR a la conclusión del proyecto, evaluadas a diferentes meses de iniciada la ejecución del proyecto. Para el proyecto Santiago se realizó el análisis en los meses 10, 20, 30, 40, 50 y 60 de ejecución del proyecto.

Figura 4-48: Ajuste del método al pronóstico del plazo final en los 10 meses de ejecución del proyecto Santiago. (a) Método EVM. (b) Metodología CTCR

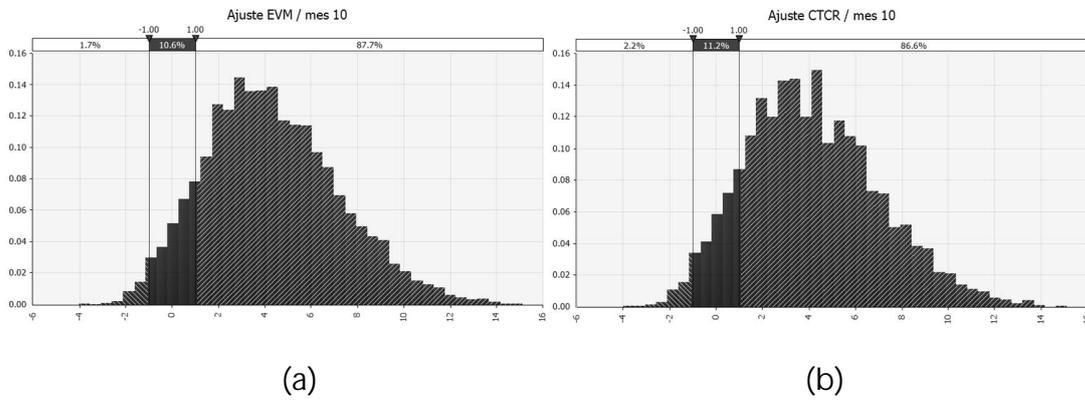


Figura 4-49: Ajuste del método al pronóstico del plazo final en los 20 meses de ejecución del proyecto Santiago. (a) Método EVM. (b) Metodología CTCR

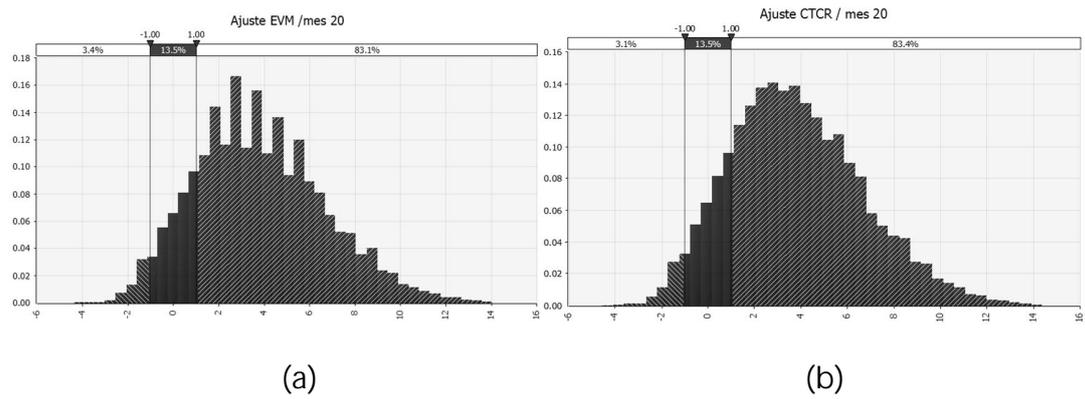


Figura 4-50: Ajuste del método al pronóstico del plazo final en los 30 meses de ejecución del proyecto Santiago. (a) Método EVM. (b) Metodología CTCR

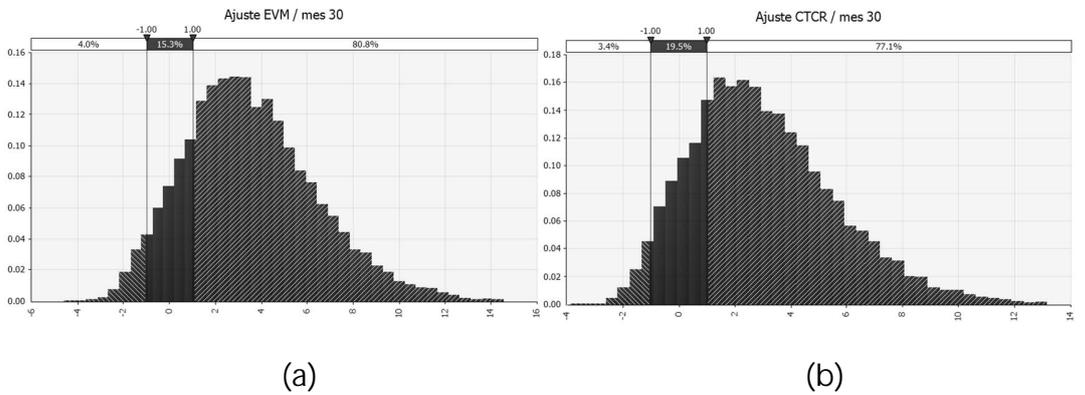


Figura 4-51: Ajuste del método al pronóstico del plazo final en los 40 meses de ejecución del proyecto Santiago. (a) Método EVM. (b) Metodología CTRC

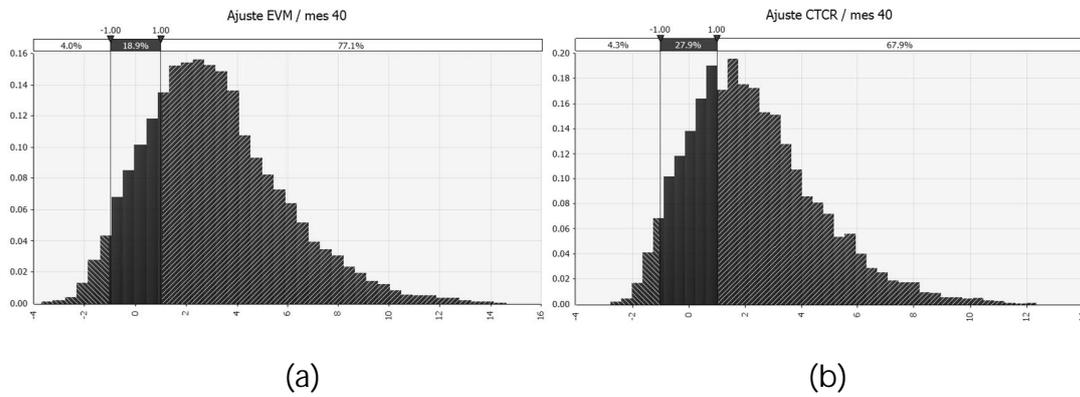


Figura 4-52: Ajuste del método al pronóstico del plazo final en los 50 meses de ejecución del proyecto Santiago. (a) Método EVM. (b) Metodología CTRC

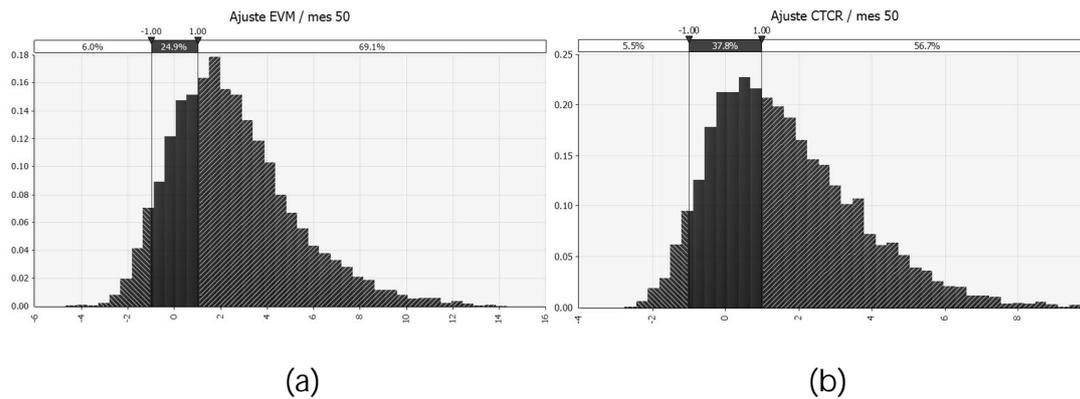
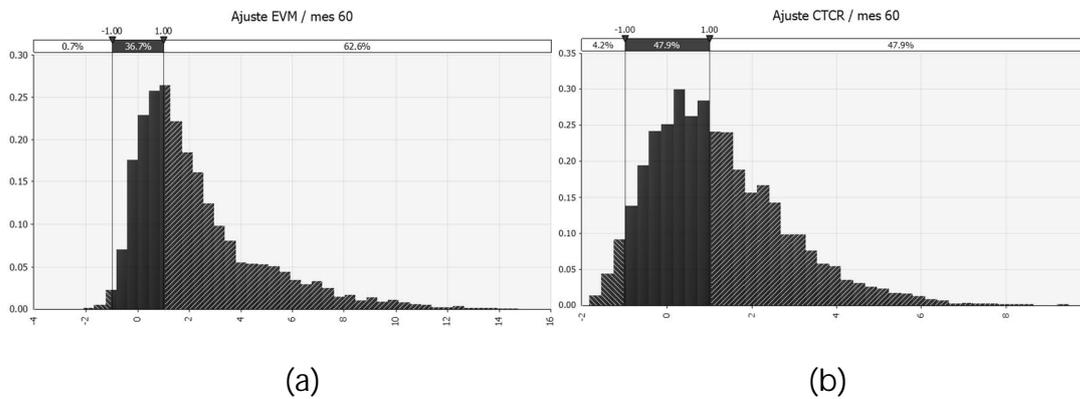


Figura 4-53: Ajuste del método al pronóstico del plazo final en los 60 meses de ejecución del proyecto Santiago. (a) Método EVM. (b) Metodología CTRC



En la Figura 4-54 hasta la Figura 4-58 se presentan los histogramas de frecuencia con las probabilidades calculadas de ajuste del plazo de los métodos EVM y CTCR a la conclusión del proyecto, evaluadas a diferentes meses faltantes para la conclusión del proyecto. Para el proyecto Santiago se realizó el análisis en los meses 10, 8, 5, 2 y 1 antes de la conclusión del proyecto según las simulaciones.

Figura 4-54: Ajuste del método al pronóstico del plazo final en el mes 10 antes de la conclusión del proyecto Santiago. (a) Método EVM. (b) Metodología CTCR

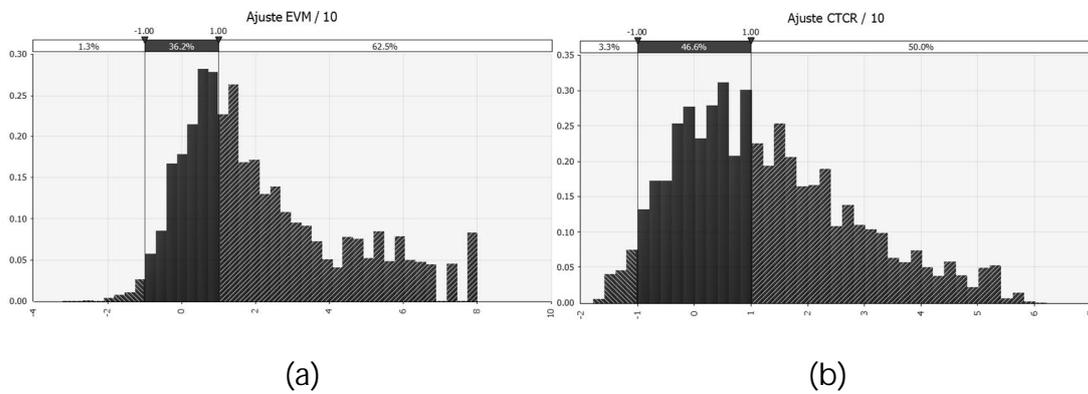


Figura 4-55: Ajuste del método al pronóstico del plazo final en el mes 8 antes de la conclusión del proyecto Santiago. (a) Método EVM. (b) Metodología CTCR

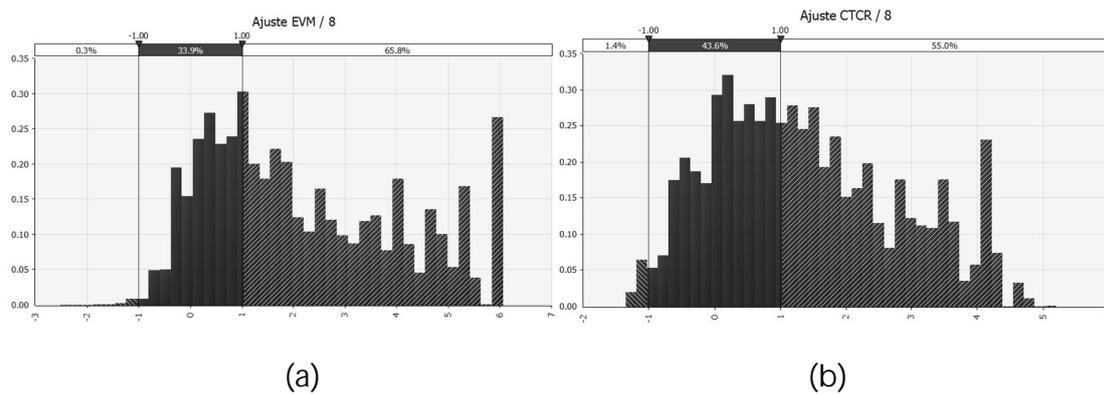


Figura 4-56: Ajuste del método al pronóstico del plazo final en el mes 5 antes de la conclusión del proyecto Santiago. (a) Método EVM. (b) Metodología CTCR

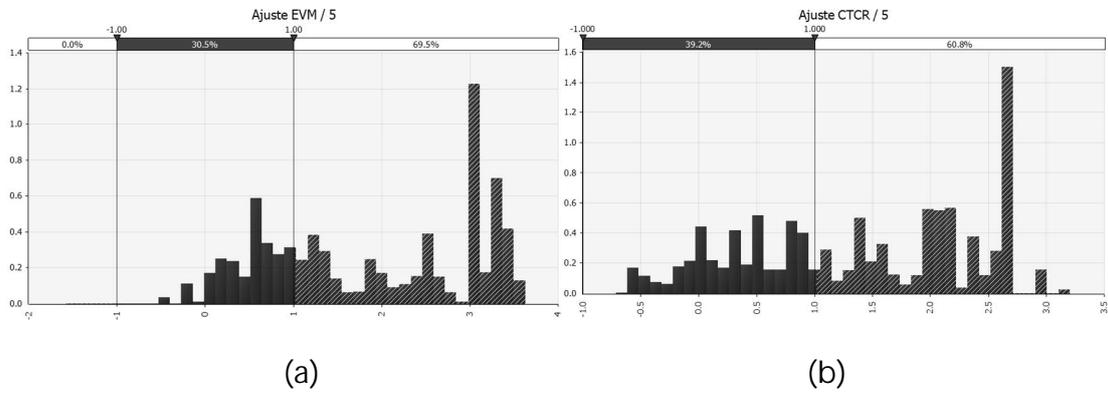


Figura 4-57: Ajuste del método al pronóstico del plazo final en el mes 2 antes de la conclusión del proyecto Santiago. (a) Método EVM. (b) Metodología CTCR

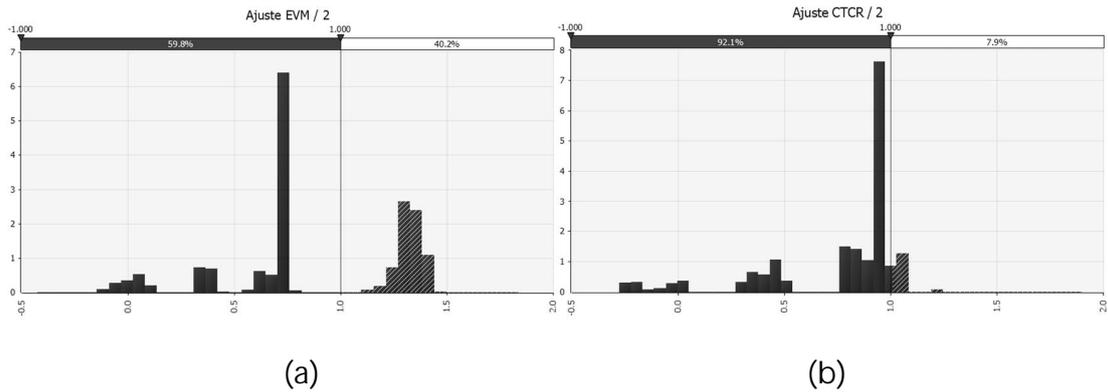
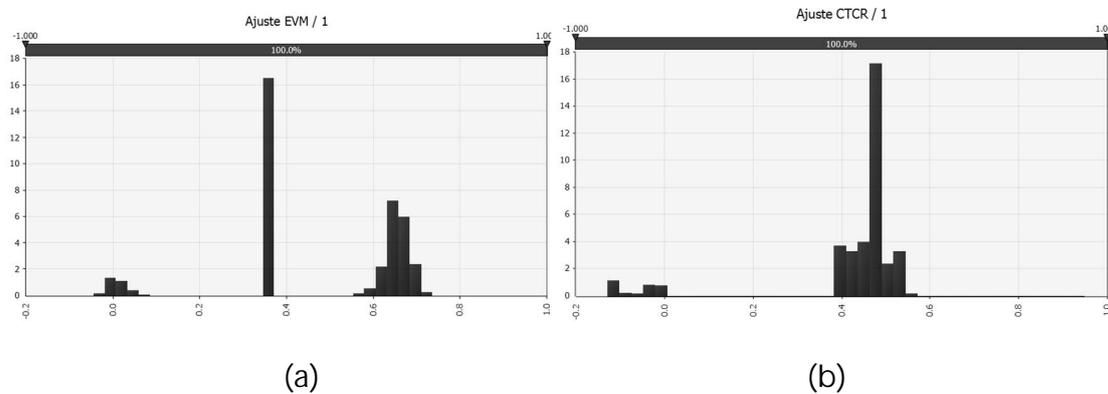
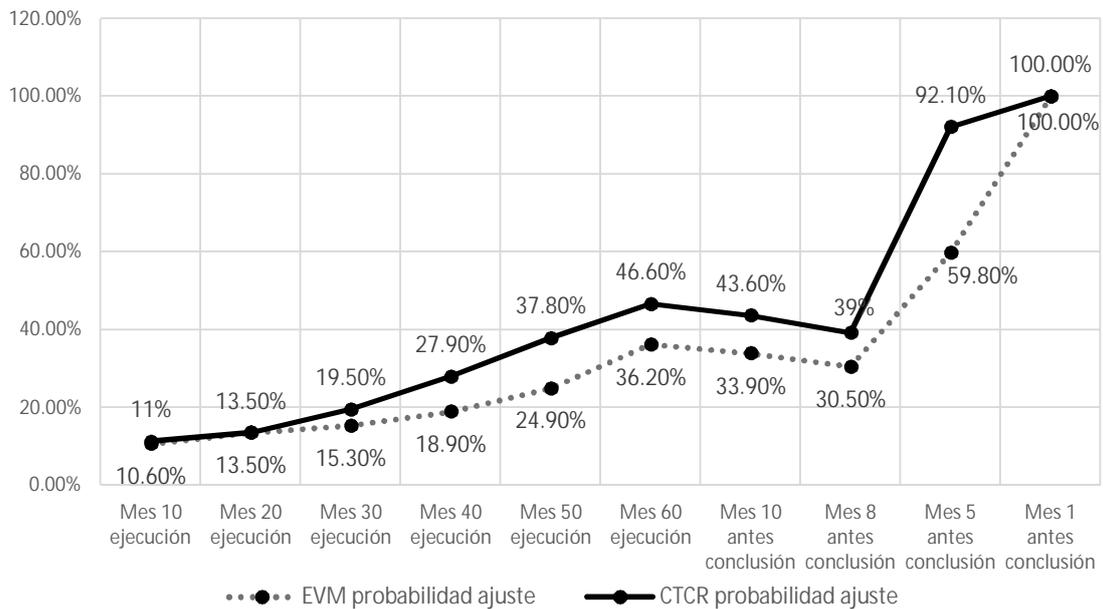


Figura 4-58: Ajuste del método al pronóstico del plazo final en el mes 1 antes de la conclusión del proyecto Santiago. (a) Método EVM. (b) Metodología CTCR



En la Figura 4-59 se presenta la evolución de como los métodos EVM y CTCR se va ajustando a través del tiempo a pronosticar adecuadamente el tiempo final de conclusión del proyecto Santiago, de acuerdo a los 10,000 escenarios del modelo de simulación.

Figura 4-59: Evolución de La probabilidad de ajuste de los métodos EVM y CTCR al pronóstico del plazo final del proyecto hidroeléctrico Santiago



Ajustándose a la tendencia presentada en los tres casos de estudio anteriores, para el proyecto hidroeléctrico Santiago se evidencia que la metodología CTCR presenta desde los primeros meses de ejecución una probabilidad de ajuste mayor al método EVM, lo que indica que CTCR predice el plazo a la conclusión del proyecto Sopladora con una mayor eficiencia que EVM, lo dicho se expone en la Figura 4-59 se evidencia que en el mes 10 antes de la conclusión del proyecto CTCR tiene una probabilidad del 43.6% de predecir correctamente el plazo de la conclusión del proyecto, mientras que EVM alcanza en el mismo periodo apenas

una probabilidad del 33.9%. De la misma forma, en el mes 5 previo a la conclusión, CTCR muestra una probabilidad del 92.1% frente al 59.8% de EVM.

## 4.6 Análisis estadístico de los datos

En el desarrollo del numeral 4.5, se aplicaron análisis probabilísticos a los modelos estocásticos de los cuatro casos de estudio, permitiendo analizar la eficiencia de las metodologías CTCR y EVM en cuanto a predicción de plazos y en cuanto a la medición del avance físico del proyecto. Los análisis probabilísticos permitieron generar bases de datos con los miles de escenarios producto de los modelos, y por tanto es factible reforzar las evidencias conseguidas a través de un análisis estadístico aplicado a estas bases de datos.

A través de un tratamiento estadístico se persigue analizar y verificar la eficiencia de la metodología CTCR en cuanto a la estimación del avance físico en la ejecución de un proyecto complejo de construcción, y además, se evidencia su efectividad en pronosticar los plazos de ejecución. De manera adicional, se realiza una comparativa entre la eficiencia lograda entre los métodos EVM y CTCR.

Este análisis estadístico se basa en una comparación entre las medias del plazo de las simulaciones realizadas en cada periodo de ejecución con las medias del plazo final cumplido en cada simulación. Se demuestra eficiencia en el método cuando las medias de cada periodo son iguales o semejantes a las medias del plazo final obtenido. En cada periodo analizado se tienen 10,000 datos producto de las 10,000 simulaciones realizadas. Se aplica la simulación en dos etapas, la primera corresponde a los periodos iniciales de ejecución del proyecto y según los proyectos del caso de estudio se aplican cada 10 meses o 5 meses según el plazo total planificado de cada caso de estudio. La segunda etapa corresponde a

aplicar la simulación en los últimos 10 meses consecutivos previo a que se concluya la ejecución del proyecto.

Estadísticamente, el método utilizado para realizar una prueba de hipótesis donde se determina si las medias de dos o más poblaciones son iguales es un análisis ANOVA o análisis de varianza. Para el análisis ANOVA, la variable de respuesta continua es el plazo de la predicción del método.

En principio, un análisis ANOVA requiere que los datos sigan una distribución aproximadamente normal con varianzas iguales, sin embargo, un procedimiento ANOVA funciona bastante bien incluso cuando se viola el supuesto de normalidad, dependiendo del tamaño de muestra. Estadísticamente se recomienda que se puede utilizar ANOVA en distribuciones no normales cuando su tamaño sea mayor a 20, en nuestro caso corresponden a 10,000 datos, por tanto si es posible emplear un análisis ANOVA.

A continuación se desarrolla la estadística descriptiva, prueba de varianzas iguales y el análisis ANOVA para cada uno de los cuatro proyectos que conforman los casos de estudio.

#### 4.6.1 Estadística para el proyecto hidroeléctrico Cardenillo

El proyecto hidroeléctrico Cardenillo tiene un plazo planificado de 75 meses, y en el modelo se tienen como variables de salida la estimación del plazo en los periodos mensuales 10, 20, 30, 40, 50 y 60 de iniciado el proyecto, y en los últimos 10 meses consecutivos previo a la conclusión, además el plazo de conclusión del proyecto. Como resultado del modelo, cada variable cuenta con 10,000 datos, resultando en total 170,000 datos.

i. Estadística descriptiva Cardenillo

En la Tabla 4-28 se presentan los principales estadísticos descriptivos para las siguientes variables de salida:

- Costo total de la simulación
- Mes de conclusión del proyecto según la simulación
- Número de meses retrasados a la conclusión en referencia al plazo planificado

Tabla 4-28: Datos de costos y plazos totales resultado de la simulación para el proyecto Cardenillo

Estadístico	Costo total	Mes conclusión	Meses de retraso
Mínimo	989.0	72.0	-11.0
Máximo	1013.5	86.0	3.0
Media	1000.9	79.2	-4.2
Desv.est.	3.3	2.4	2.4
Varianza	10.9	5.5	5.5
Asimetría	0.1	0.4	-0.4
Curtosis	3.1	3.0	3.0
Moda	1002.0	79.0	-4.0

En la Tabla 4-29 se presentan los principales estadísticos descriptivos para los datos de la variable de pronóstico de meses de retraso en los primeros periodos de ejecución del proyecto Cardenillo. Se presentan los datos resultantes para las metodologías EVM y CTCR.

Tabla 4-29: Meses de retraso estimados según EVM y CTCR en los periodos iniciales de ejecución del proyecto Cardenillo

Estadístico	EVM						CTCR					
	Mes 10	Mes 20	Mes 30	Mes 40	Mes 50	Mes 60	Mes 10	Mes 20	Mes 30	Mes 40	Mes 50	Mes 60
Mínimo	-3.1	-5.5	-7.0	-7.6	-8.1	-8.6	-3.0	-4.7	-6.6	-7.1	-7.9	-9.1
Máximo	0.1	0.2	0.7	1.0	1.2	1.1	0.1	0.3	0.6	0.9	1.1	1.2
Media	-0.7	-1.5	-1.7	-1.9	-2.2	-2.7	-0.8	-1.4	-2.0	-2.2	-2.6	-3.3
Desv.est.	0.5	1.1	1.2	1.3	1.2	1.5	0.5	0.9	1.1	1.2	1.2	1.5
Varianza	0.23	1.24	1.40	1.70	1.40	2.20	0.25	0.74	1.17	1.40	1.43	2.15
Asimetría	-0.45	-0.66	-0.65	-0.62	-0.49	-0.41	-0.35	-0.55	-0.54	-0.47	-0.41	-0.10
Curtosis	2.98	3.06	3.27	3.19	3.75	2.93	2.96	3.01	3.20	3.19	3.56	3.09
Moda	0.0	-4.5	-2.1	-1.2	-2.2	-2.5	0.0	-3.6	-2.8	-2.1	-1.1	-2.8

En la Tabla 4-30 y Tabla 4-31 se presentan los principales estadísticos descriptivos para los datos de la variable de pronóstico de meses de retraso en los últimos 10 periodos de ejecución del proyecto Cardenillo previo a la conclusión. Se presentan los datos resultantes para las metodologías EVM y CTCR.

Tabla 4-30: Meses de retraso estimados con EVM en los últimos meses previo a la conclusión para el proyecto hidroeléctrico Cardenillo

Estadístico	Meses de retraso (EVM) en últimos meses previo a conclusión										
	Mes 10	Mes 9	Mes 8	Mes 7	Mes 6	Mes 5	Mes 4	Mes 3	Mes 2	Mes 1	
Mínimo	-9.2	-9.6	-9.9	-10.7	-11.5	-12.3	-13.1	-13.8	-14.3	-14.7	
Máximo	0.9	0.7	0.7	0.6	0.6	0.9	1.7	1.8	2.1	3.0	
Media	-2.7	-2.8	-3.1	-3.5	-3.9	-4.2	-4.3	-4.3	-4.2	-4.2	
Desv.est.	1.5	1.7	1.9	2.1	2.1	2.2	2.3	2.3	2.3	2.4	
Varianza	2.4	2.8	3.5	4.2	4.6	4.9	5.2	5.4	5.5	5.6	
Asimetría	-0.8	-0.9	-0.8	-0.7	-0.6	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.4	
Curtosis	3.7	3.8	3.6	3.3	3.2	3.2	3.2	3.3	3.3	3.1	
Moda	-2.6	-3.4	-4.2	-5.0	-3.4	-3.8	-4.0	-4.0	-4.0	-4.0	

Tabla 4-31: Meses de retraso estimados con CTCR en los últimos meses previo a la conclusión para el proyecto hidroeléctrico Cardenillo

Estadístico	Meses de retraso (CTCR) en últimos meses previo a conclusión									
	Mes 10	Mes 9	Mes 8	Mes 7	Mes 6	Mes 5	Mes 4	Mes 3	Mes 2	Mes 1
Mínimo	-11.6	-12.1	-12.5	-13.0	-13.5	-13.9	-14.3	-14.7	-15.1	-15.3
Máximo	1.2	1.2	1.2	1.3	1.4	1.4	1.8	2.3	2.7	3.0
Media	-3.5	-3.6	-3.7	-3.9	-4.2	-4.3	-4.2	-4.2	-4.2	-4.2
Desv.est.	1.9	2.0	2.1	2.2	2.3	2.3	2.3	2.4	2.4	2.4
Varianza	3.6	4.0	4.5	5.0	5.4	5.5	5.5	5.6	5.6	5.6
Asimetría	-0.7	-0.7	-0.7	-0.6	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.4	-0.4
Curtosis	3.6	3.6	3.4	3.2	3.1	3.2	3.3	3.3	3.3	3.1
Moda	-6.7	-5.0	-3.4	-3.7	-4.7	-3.9	-4.0	-4.0	-4.0	-4.0

j. Prueba de varianzas iguales Cardenillo

Previo a proceder con el análisis ANOVA es necesario ejecutar una prueba de varianzas iguales que permita verificar justamente si existe o no igualdad entre varianzas de las variables del análisis. Según los resultados de esta prueba, se puede configurar los requerimientos de un análisis ANOVA y del software para su corrida.

Los datos cumplen los requerimientos estadísticos para realizar la prueba de varianzas iguales, estos son:

- Las variables de respuesta, es decir el pronóstico de plazos, es una variable continua.
- El tamaño de la muestra es mayor a 20. Se tienen 10,000 datos por cada variable
- Cada observación es independiente de todas las demás observaciones, debido a la aleatoriedad que maneja un modelo estocástico con simulación Monte Carlo.

El nivel simultáneo de confianza de Bonferroni utilizado es del 95%.

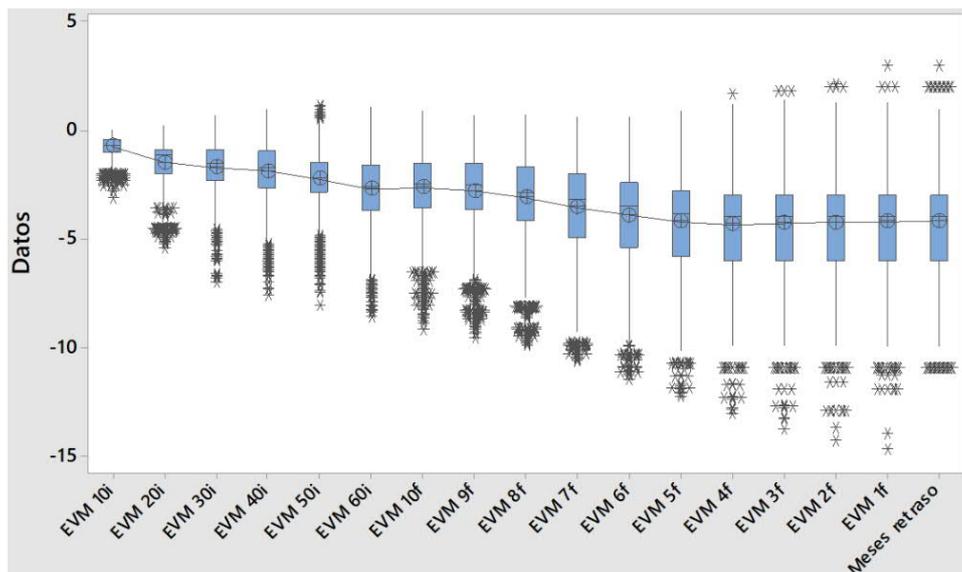
Al tratarse de datos no normales, las pruebas utilizadas son la comparación múltiple y la prueba de Levene.

Para los datos obtenidos con el método EVM, se presentaron los siguientes resultados:

En la Figura 4-60 se presenta un diagrama de caja para las variables analizadas, donde se presenta:

- “Meses retraso” que es la variable de los meses totales de retraso a la conclusión del proyecto.
- “EVM 10i...60i” son las variables de pronóstico de plazo en los periodos de inicio del proyecto transcurridos: 10 meses, 20 meses... hasta los 60 meses.
- “EVM 10f...1f” son las variables de pronóstico de plazo en los periodos de fin del proyecto en los meses: 10 meses, 9 meses... hasta 1 mes antes de concluida la ejecución del proyecto.

Figura 4-60: Gráfica de caja de las variables para EV. Proyecto Cardenillo



Prueba de igualdad de varianzas

Las hipótesis para una prueba de varianzas iguales son las siguientes:

- Hipótesis nula ( $H_0$ ).- La hipótesis nula indica que las varianzas son todas iguales.
- Hipótesis alternativa ( $H_A$ ).- La hipótesis alternativa indica que por lo menos una de las varianzas es diferente.
- Nivel de significancia  $\alpha = 0,05$

En la Tabla 4-32 se presentan los intervalos de confianza para las desviaciones estándar calculadas con el software Minitab® V18.

Tabla 4-32: Intervalos de confianza de Bonferroni de 95% para desviaciones estándar para EVM para el proyecto Cardenillo

Muestra	N	Desv.Est.	IC
Meses retraso	10000	2,35291	(2,30438; 2,40318)
EVM 10i	10000	0,48177	(0,47183; 0,49207)
EVM 20i	10000	1,11350	(1,09004; 1,13781)
EVM 30i	10000	1,18493	(1,15872; 1,21209)
EVM 40i	10000	1,30557	(1,27724; 1,33493)
EVM 50i	10000	1,18296	(1,15426; 1,21273)
EVM 60i	10000	1,48365	(1,45343; 1,51495)
EVM 10f	10000	1,54480	(1,50729; 1,58371)
EVM 9f	10000	1,68419	(1,64300; 1,72693)
EVM 8f	10000	1,87546	(1,83145; 1,92108)
EVM 7f	10000	2,05523	(2,00971; 2,10242)
EVM 6f	10000	2,13810	(2,09157; 2,18631)
EVM 5f	10000	2,20873	(2,16073; 2,25846)
EVM 4f	10000	2,27676	(2,22703; 2,32830)
EVM 3f	10000	2,31551	(2,26424; 2,36865)
EVM 2f	10000	2,34792	(2,29608; 2,40165)
EVM 1f	10000	2,35956	(2,30898; 2,41198)

Nivel de confianza individual = 99,7059%

En la Tabla 4-33 se presentan los resultados de la aplicación de las pruebas de comparaciones múltiples y Levene, donde se indican los resultados de “Valor p” para la toma de decisiones en las pruebas de hipótesis planteadas.

Tabla 4-33: Resultados de las pruebas de comparaciones múltiples y Levene para EVM. Proyecto Cardenillo

Método	Estadística de prueba	Valor p
Comparaciones múltiples	—	0,000
Levene	1399,08	0,000

Como resultado final de la prueba de igualdad de varianzas para EVM, tenemos que el “Valor p” para los métodos de comparaciones múltiples y Levene presentan valores menores a 0.05, por tanto se rechaza la hipótesis nula concluyendo que no existe igualdad de varianzas de las variables analizadas.

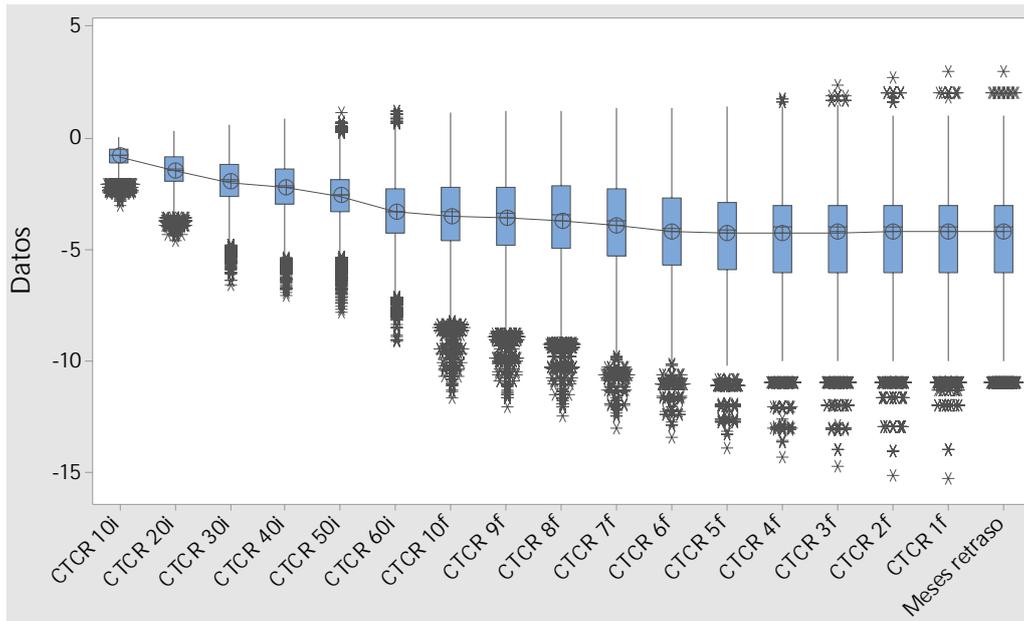
Para los datos obtenidos con el método CTCR, se presentaron los siguientes resultados:

En la Figura 4-61 se presenta un diagrama de caja para las variables analizadas, donde se presenta:

- “Meses retraso” que es la variable de los meses totales de retraso a la conclusión del proyecto.
- “CTCR 10i...60i” son las variables de pronóstico de plazo en los periodos de inicio del proyecto transcurridos: 10 meses, 20 meses... hasta los 60 meses.

- “CTCR 10f...1f” son las variables de pronóstico de plazo en los periodos de fin del proyecto en los meses: 10 meses, 9 meses... hasta 1 mes antes de concluida la ejecución del proyecto.

Figura 4-61: Gráfica de caja de las variables para CTCR. Proyecto Cardenillo



Prueba de igualdad de varianzas

Las hipótesis para una prueba de varianzas iguales son las siguientes:

- Hipótesis nula ( $H_0$ ).- La hipótesis nula indica que las varianzas son todas iguales.
- Hipótesis alternativa ( $H_A$ ).- La hipótesis alternativa indica que por lo menos una de las varianzas es diferente.
- Nivel de significancia  $\alpha = 0,05$

En la Tabla 4-34 se presentan los intervalos de confianza para las desviaciones estándar calculadas con el software Minitab® V18.

Tabla 4-34: Intervalos de confianza de Bonferroni de 95% para desviaciones estándar para CTCR. Proyecto Cardenillo

Muestra	N	Desv.Est.	IC
Meses retraso	10000	2,35291	(2,30438; 2,40318)
CTCR 10i	10000	0,49679	(0,48659; 0,50735)
CTCR 20i	10000	0,85789	(0,84006; 0,87635)
CTCR 30i	10000	1,08279	(1,05923; 1,10720)
CTCR 40i	10000	1,18395	(1,15828; 1,21056)
CTCR 50i	10000	1,19706	(1,16906; 1,22609)
CTCR 60i	10000	1,46785	(1,43681; 1,50001)
CTCR 10f	10000	1,90412	(1,85868; 1,95125)
CTCR 9f	10000	1,99891	(1,95147; 2,04811)
CTCR 8f	10000	2,12357	(2,07502; 2,17391)
CTCR 7f	10000	2,23779	(2,18866; 2,28870)
CTCR 6f	10000	2,31456	(2,26481; 2,36611)
CTCR 5f	10000	2,34218	(2,29143; 2,39476)
CTCR 4f	10000	2,34307	(2,29120; 2,39684)
CTCR 3f	10000	2,36184	(2,30943; 2,41616)
CTCR 2f	10000	2,37222	(2,31997; 2,42636)
CTCR 1f	10000	2,36840	(2,31764; 2,42098)

Nivel de confianza individual = 99,7059%

En la Tabla 4-35 se presentan los resultados de la aplicación de las pruebas de comparaciones múltiples y Levene, donde se indican los resultados de “Valor p” para la toma de decisiones en las pruebas de hipótesis planteadas.

Tabla 4-35: Resultados de las pruebas de comparaciones múltiples y Levene para CTCR. Proyecto Cardenillo

Método	Estadística de prueba	Valor p
Comparaciones múltiples	—	0,000
Levene	1658,84	0,000

Como resultado final de la prueba de igualdad de varianzas para CTCR, tenemos que el "Valor p" para los métodos de comparaciones múltiples y Levene presentan valores menores a 0.05, por tanto se rechaza la hipótesis nula concluyendo que no existe igualdad de varianzas de las variables analizadas.

k. Análisis ANOVA Cardenillo

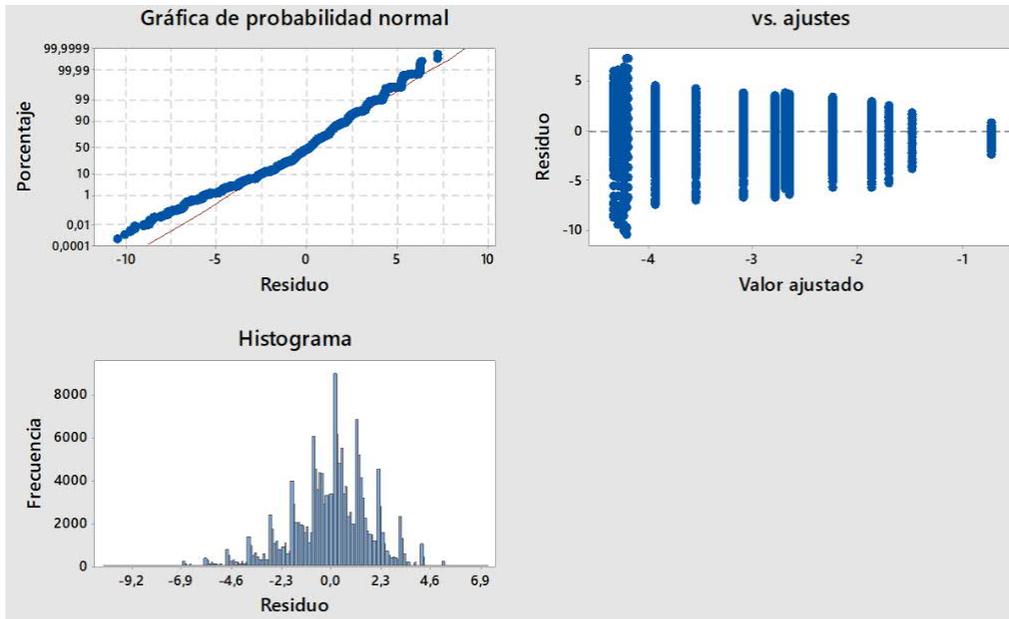
Para este estudio se realizó un análisis ANOVA de un factor. El plazo pronosticado en diferentes periodos de ejecución del proyecto representa el único factor del análisis.

Por otra parte, de acuerdo al análisis de varianzas iguales realizado y presentado en el literal (b) anterior, existe diferencia de varianzas en los grupos de variables analizadas tanto para EVM como para CTCR, y por este motivo se realiza una prueba de Welch de ANOVA. Para el análisis se utilizó el software Minitab® V18.

Para los datos de EVM, el análisis ANOVA determinó los resultados siguientes:

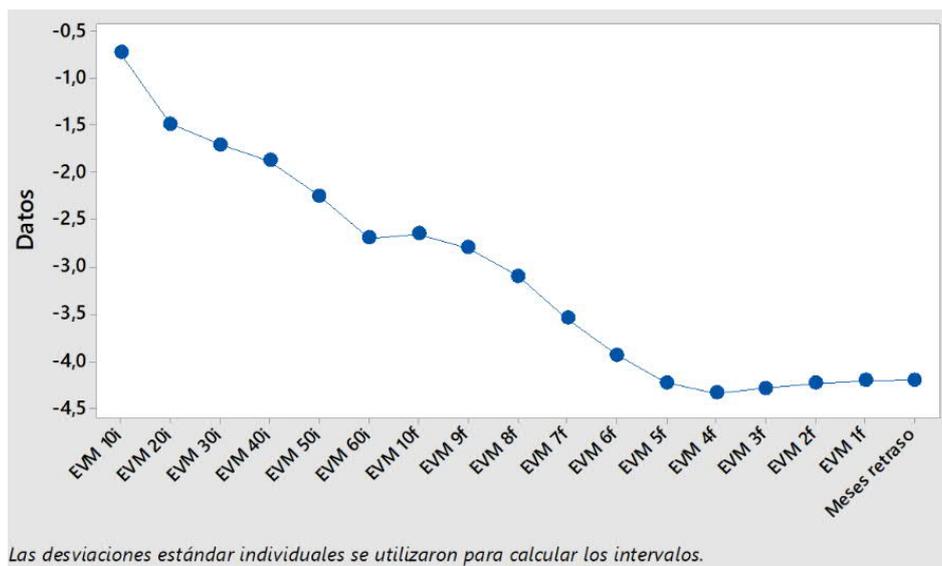
En la Figura 4-62 se presentan las gráficas de residuos obtenidas.

Figura 4-62: Gráficas de residuos para EMV del proyecto Cardenillo



En la Figura 4-63 se presentan los intervalos para EVM, con el 95% de Intervalo de Confianza para la media de las variables analizadas.

Figura 4-63: Gráfica de intervalos para EMV- 95% IC para la media. Proyecto Cardenillo



Las hipótesis para el análisis ANOVA de un solo factor son las siguientes:

- Hipótesis nula ( $H_0$ ).- Todas las medias son iguales.
- Hipótesis alternativa ( $H_A$ ).- No todas las medias son iguales.
- Nivel de significancia  $\alpha = 0,05$
- No se presupuso igualdad de varianzas para el análisis

En la Tabla 4-36 se presenta la información básica para el factor de análisis que representa el plazo pronosticado por el método EVM en los diferentes periodos de tiempo de ejecución del proyecto.

Tabla 4-36: Información del facto para EVM del proyecto Cardenillo

Factor	Niveles	Valores
Factor	17	EVM 10i; EVM 20i; EVM 30i; EVM 40i; EVM 50i; EVM 60i; EVM 10f; EVM 9f; EVM 8f; EVM 7f; EVM 6f; EVM 5f; EVM 4f; EVM 3f; EVM 2f; EVM 1f; Meses retraso

En la Tabla 4-37 se presenta los resultados de la prueba de Welch, donde se tiene el "Valor p" para la toma de decisión de la prueba de hipótesis.

Tabla 4-37: Resultados de la prueba de Welch para EVM. Proyecto Cardenillo

Fuente	GL Num	GL Den	Valor F	Valor p
Factor	16	63128,2	9493,00	0,000

Resultados del análisis de las medias del plazo pronosticado en cada periodo de análisis.- El factor es el plazo pronosticado y el IC es el intervalo de confianza de las medias del grupo. Estos intervalos de confianza son rangos de valores que probablemente contienen la media real de cada población. El porcentaje de estos

intervalos de confianza que contienen el parámetro es el nivel de confianza del intervalo. En la Tabla 4-38 se presentan estos resultados.

Tabla 4-38: Resultados del análisis de medias y su IC para EVM. Proyecto Cardenillo

Factor	N	Media	Desv.Est.	IC de 95%
EVM 10i	10000	-0,72436	0,48177	(-0,73380; -0,71491)
EVM 20i	10000	-1,4846	1,1135	(-1,5064; -1,4628)
EVM 30i	10000	-1,7040	1,1849	(-1,7272; -1,6808)
EVM 40i	10000	-1,8753	1,3056	(-1,9009; -1,8497)
EVM 50i	10000	-2,2470	1,1830	(-2,2702; -2,2238)
EVM 60i	10000	-2,6952	1,4836	(-2,7243; -2,6661)
EVM 10f	10000	-2,6504	1,5448	(-2,6807; -2,6201)
EVM 9f	10000	-2,7991	1,6842	(-2,8321; -2,7661)
EVM 8f	10000	-3,0978	1,8755	(-3,1346; -3,0611)
EVM 7f	10000	-3,5495	2,0552	(-3,5898; -3,5092)
EVM 6f	10000	-3,9385	2,1381	(-3,9804; -3,8965)
EVM 5f	10000	-4,2340	2,2087	(-4,2773; -4,1907)
EVM 4f	10000	-4,3399	2,2768	(-4,3845; -4,2953)
EVM 3f	10000	-4,2908	2,3155	(-4,3361; -4,2454)
EVM 2f	10000	-4,2388	2,3479	(-4,2848; -4,1927)
EVM 1f	10000	-4,2097	2,3596	(-4,2560; -4,1635)
Meses retraso	10000	-4,2004	2,3529	(-4,2465; -4,1543)

Comparaciones en parejas de Games-Howell.- Como se presupuso que las varianzas no son iguales, el análisis ANOVA realizó una prueba Games-Howell que permite comparar todos los pares del grupo, con control del nivel de confianza simultáneo. En la Tabla 4-39 se presentan los resultados.

Tabla 4-39: Agrupación de datos utilizando el método de Games-Howell y una confianza de 95% para EVM. Proyecto Cardenillo

Factor	N	Media	Agrupación
EVM 10i	10000	-0,72436	A
EVM 20i	10000	-1,4846	B
EVM 30i	10000	-1,7040	C
EVM 40i	10000	-1,8753	D
EVM 50i	10000	-2,2470	E
EVM 10f	10000	-2,6504	F
EVM 60i	10000	-2,6952	F
EVM 9f	10000	-2,7991	G
EVM 8f	10000	-3,0978	H
EVM 7f	10000	-3,5495	I
EVM 6f	10000	-3,9385	J
Meses retraso	10000	-4,2004	K
EVM 1f	10000	-4,2097	K
EVM 5f	10000	-4,2340	K L
EVM 2f	10000	-4,2388	K L
EVM 3f	10000	-4,2908	K L
EVM 4f	10000	-4,3399	L

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Los resultados presentados en la Tabla 4-39 indican que el grupo "K" demuestran medias iguales, esto corresponde a los niveles de factor: EVM5f hasta la conclusión del proyecto, por tanto indica que el método EVM demuestra una adecuada precisión y eficiencia desde los 5 meses previos a concluir el proyecto en adelante.

Lo dicho se puede también comprobar en las pruebas simultáneas de Games-Howell presentadas en la Tabla 4-40, donde el "Valor p" demuestra un valor

superior al nivel de significancia de 0.05, y por tanto indicando una igualdad de medias para los niveles de factor de 5 meses previos a la conclusión.

Tabla 4-40: Pruebas simultáneas de Games-Howell para diferencias de las medias para EVM. Proyecto Cardenillo

Diferencia de niveles	Diferencia de las medias	EE de diferencia	IC de 95%	Valor T	Valor p ajustado
EVM 20i - EVM 10i	-0,7602	0,0121	(-0,8022; -0,7183)	-62,66	0,000
EVM 30i - EVM 10i	-0,9797	0,0128	(-1,0239; -0,9354)	-76,59	0,000
EVM 40i - EVM 10i	-1,1509	0,0139	(-1,1991; -1,1028)	-82,70	0,000
EVM 50i - EVM 10i	-1,5226	0,0128	(-1,5668; -1,4785)	-119,21	0,000
EVM 60i - EVM 10i	-1,9708	0,0156	(-2,0248; -1,9169)	-126,34	0,000
EVM 10f - EVM 10i	-1,9260	0,0162	(-1,9820; -1,8701)	-119,03	0,000
EVM 9f - EVM 10i	-2,0747	0,0175	(-2,1353; -2,0141)	-118,44	0,000
EVM 8f - EVM 10i	-2,3735	0,0194	(-2,4404; -2,3065)	-122,57	0,000
EVM 7f - EVM 10i	-2,8252	0,0211	(-2,8982; -2,7522)	-133,83	0,000
EVM 6f - EVM 10i	-3,2141	0,0219	(-3,2899; -3,1383)	-146,65	0,000
EVM 5f - EVM 10i	-3,5096	0,0226	(-3,5878; -3,4315)	-155,25	0,000
EVM 4f - EVM 10i	-3,6155	0,0233	(-3,6960; -3,5351)	-155,36	0,000
EVM 3f - EVM 10i	-3,5664	0,0237	(-3,6482; -3,4846)	-150,79	0,000
EVM 2f - EVM 10i	-3,5144	0,0240	(-3,5973; -3,4315)	-146,63	0,000
EVM 1f - EVM 10i	-3,4854	0,0241	(-3,5687; -3,4021)	-144,73	0,000
Meses retras - EVM 10i	-3,4760	0,0240	(-3,5591; -3,3930)	-144,73	0,000
EVM 30i - EVM 20i	-0,2194	0,0163	(-0,2756; -0,1632)	-13,49	0,000
EVM 40i - EVM 20i	-0,3907	0,0172	(-0,4500; -0,3314)	-22,77	0,000
EVM 50i - EVM 20i	-0,7624	0,0162	(-0,8186; -0,7062)	-46,93	0,000
EVM 60i - EVM 20i	-1,2106	0,0186	(-1,2747; -1,1464)	-65,26	0,000
EVM 10f - EVM 20i	-1,1658	0,0190	(-1,2317; -1,1000)	-61,22	0,000
EVM 9f - EVM 20i	-1,3145	0,0202	(-1,3843; -1,2447)	-65,10	0,000
EVM 8f - EVM 20i	-1,6132	0,0218	(-1,6886; -1,5378)	-73,96	0,000
EVM 7f - EVM 20i	-2,0649	0,0234	(-2,1458; -1,9841)	-88,34	0,000
EVM 6f - EVM 20i	-2,4539	0,0241	(-2,5372; -2,3705)	-101,79	0,000
EVM 5f - EVM 20i	-2,7494	0,0247	(-2,8349; -2,6639)	-111,15	0,000
EVM 4f - EVM 20i	-2,8553	0,0253	(-2,9429; -2,7677)	-112,66	0,000

Aplicación en el sector hidroenergético

EVM 3f - EVM 20i	-2,8062	0,0257	(-2,8950; -2,7173)	-109,22	0,000
EVM 2f - EVM 20i	-2,7542	0,0260	(-2,8440; -2,6643)	-105,99	0,000
EVM 1f - EVM 20i	-2,7251	0,0261	(-2,8154; -2,6349)	-104,45	0,000
Meses retras - EVM 20i	-2,7158	0,0260	(-2,8058; -2,6258)	-104,33	0,000
EVM 40i - EVM 30i	-0,1713	0,0176	(-0,2322; -0,1103)	-9,71	0,000
EVM 50i - EVM 30i	-0,5430	0,0167	(-0,6009; -0,4851)	-32,43	0,000
EVM 60i - EVM 30i	-0,9912	0,0190	(-1,0568; -0,9255)	-52,20	0,000
EVM 10f - EVM 30i	-0,9464	0,0195	(-1,0137; -0,8791)	-48,61	0,000
EVM 9f - EVM 30i	-1,0951	0,0206	(-1,1663; -1,0238)	-53,18	0,000
EVM 8f - EVM 30i	-1,3938	0,0222	(-1,4705; -1,3171)	-62,83	0,000
EVM 7f - EVM 30i	-1,8455	0,0237	(-1,9275; -1,7635)	-77,79	0,000
EVM 6f - EVM 30i	-2,2344	0,0244	(-2,3190; -2,1499)	-91,41	0,000
EVM 5f - EVM 30i	-2,5300	0,0251	(-2,6166; -2,4433)	-100,94	0,000
EVM 4f - EVM 30i	-2,6359	0,0257	(-2,7246; -2,5471)	-102,70	0,000
EVM 3f - EVM 30i	-2,5867	0,0260	(-2,6767; -2,4968)	-99,45	0,000
EVM 2f - EVM 30i	-2,5347	0,0263	(-2,6257; -2,4438)	-96,38	0,000
EVM 1f - EVM 30i	-2,5057	0,0264	(-2,5970; -2,4144)	-94,90	0,000
Meses retras - EVM 30i	-2,4964	0,0263	(-2,5875; -2,4053)	-94,76	0,000
EVM 50i - EVM 40i	-0,3717	0,0176	(-0,4326; -0,3108)	-21,10	0,000
EVM 60i - EVM 40i	-0,8199	0,0198	(-0,8882; -0,7516)	-41,49	0,000
EVM 10f - EVM 40i	-0,7751	0,0202	(-0,8450; -0,7052)	-38,32	0,000
EVM 9f - EVM 40i	-0,9238	0,0213	(-0,9975; -0,8501)	-43,35	0,000
EVM 8f - EVM 40i	-1,2225	0,0229	(-1,3015; -1,1435)	-53,50	0,000
EVM 7f - EVM 40i	-1,6742	0,0243	(-1,7584; -1,5900)	-68,76	0,000
EVM 6f - EVM 40i	-2,0632	0,0251	(-2,1498; -1,9765)	-82,36	0,000
EVM 5f - EVM 40i	-2,3587	0,0257	(-2,4474; -2,2700)	-91,93	0,000
EVM 4f - EVM 40i	-2,4646	0,0262	(-2,5554; -2,3739)	-93,91	0,000
EVM 3f - EVM 40i	-2,4155	0,0266	(-2,5074; -2,3236)	-90,87	0,000
EVM 2f - EVM 40i	-2,3635	0,0269	(-2,4564; -2,2706)	-87,98	0,000
EVM 1f - EVM 40i	-2,3345	0,0270	(-2,4277; -2,2412)	-86,57	0,000
Meses retras - EVM 40i	-2,3251	0,0269	(-2,4182; -2,2321)	-86,41	0,000
EVM 60i - EVM 50i	-0,4482	0,0190	(-0,5138; -0,3826)	-23,62	0,000
EVM 10f - EVM 50i	-0,4034	0,0195	(-0,4707; -0,3361)	-20,73	0,000
EVM 9f - EVM 50i	-0,5521	0,0206	(-0,6232; -0,4809)	-26,82	0,000

Aplicación en el sector hidroenergético

EVM 8f - EVM 50i	-0,8508	0,0222	(-0,9275; -0,7742)	-38,37	0,000
EVM 7f - EVM 50i	-1,3025	0,0237	(-1,3845; -1,2205)	-54,93	0,000
EVM 6f - EVM 50i	-1,6915	0,0244	(-1,7760; -1,6070)	-69,22	0,000
EVM 5f - EVM 50i	-1,9870	0,0251	(-2,0736; -1,9004)	-79,30	0,000
EVM 4f - EVM 50i	-2,0929	0,0257	(-2,1816; -2,0042)	-81,57	0,000
EVM 3f - EVM 50i	-2,0438	0,0260	(-2,1337; -1,9539)	-78,60	0,000
EVM 2f - EVM 50i	-1,9918	0,0263	(-2,0827; -1,9008)	-75,76	0,000
EVM 1f - EVM 50i	-1,9627	0,0264	(-2,0540; -1,8715)	-74,36	0,000
Meses retras - EVM 50i	-1,9534	0,0263	(-2,0445; -1,8623)	-74,17	0,000
EVM 10f - EVM 60i	0,0448	0,0214	(-0,0293; 0,1188)	2,09	0,798
EVM 9f - EVM 60i	-0,1039	0,0224	(-0,1815; -0,0263)	-4,63	0,000
EVM 8f - EVM 60i	-0,4026	0,0239	(-0,4853; -0,3200)	-16,84	0,000
EVM 7f - EVM 60i	-0,8543	0,0253	(-0,9420; -0,7667)	-33,70	0,000
EVM 6f - EVM 60i	-1,2433	0,0260	(-1,3333; -1,1533)	-47,77	0,000
EVM 5f - EVM 60i	-1,5388	0,0266	(-1,6308; -1,4468)	-57,83	0,000
EVM 4f - EVM 60i	-1,6447	0,0272	(-1,7387; -1,5507)	-60,52	0,000
EVM 3f - EVM 60i	-1,5956	0,0275	(-1,6907; -1,5005)	-58,02	0,000
EVM 2f - EVM 60i	-1,5436	0,0278	(-1,6396; -1,4475)	-55,58	0,000
EVM 1f - EVM 60i	-1,5146	0,0279	(-1,6109; -1,4182)	-54,34	0,000
Meses retras - EVM 60i	-1,5052	0,0278	(-1,6014; -1,4090)	-54,11	0,000
EVM 9f - EVM 10f	-0,1487	0,0229	(-0,2277; -0,0696)	-6,51	0,000
EVM 8f - EVM 10f	-0,4474	0,0243	(-0,5314; -0,3634)	-18,41	0,000
EVM 7f - EVM 10f	-0,8991	0,0257	(-0,9880; -0,8102)	-34,97	0,000
EVM 6f - EVM 10f	-1,2881	0,0264	(-1,3793; -1,1969)	-48,83	0,000
EVM 5f - EVM 10f	-1,5836	0,0270	(-1,6768; -1,4904)	-58,75	0,000
EVM 4f - EVM 10f	-1,6895	0,0275	(-1,7846; -1,5944)	-61,41	0,000
EVM 3f - EVM 10f	-1,6404	0,0278	(-1,7366; -1,5441)	-58,93	0,000
EVM 2f - EVM 10f	-1,5883	0,0281	(-1,6855; -1,4912)	-56,51	0,000
EVM 1f - EVM 10f	-1,5593	0,0282	(-1,6569; -1,4618)	-55,29	0,000
Meses retras - EVM 10f	-1,5500	0,0281	(-1,6473; -1,4527)	-55,07	0,000
EVM 8f - EVM 9f	-0,2988	0,0252	(-0,3859; -0,2116)	-11,85	0,000
EVM 7f - EVM 9f	-0,7505	0,0266	(-0,8423; -0,6586)	-28,24	0,000
EVM 6f - EVM 9f	-1,1394	0,0272	(-1,2335; -1,0453)	-41,86	0,000
EVM 5f - EVM 9f	-1,4349	0,0278	(-1,5310; -1,3389)	-51,66	0,000

Aplicación en el sector hidroenergético

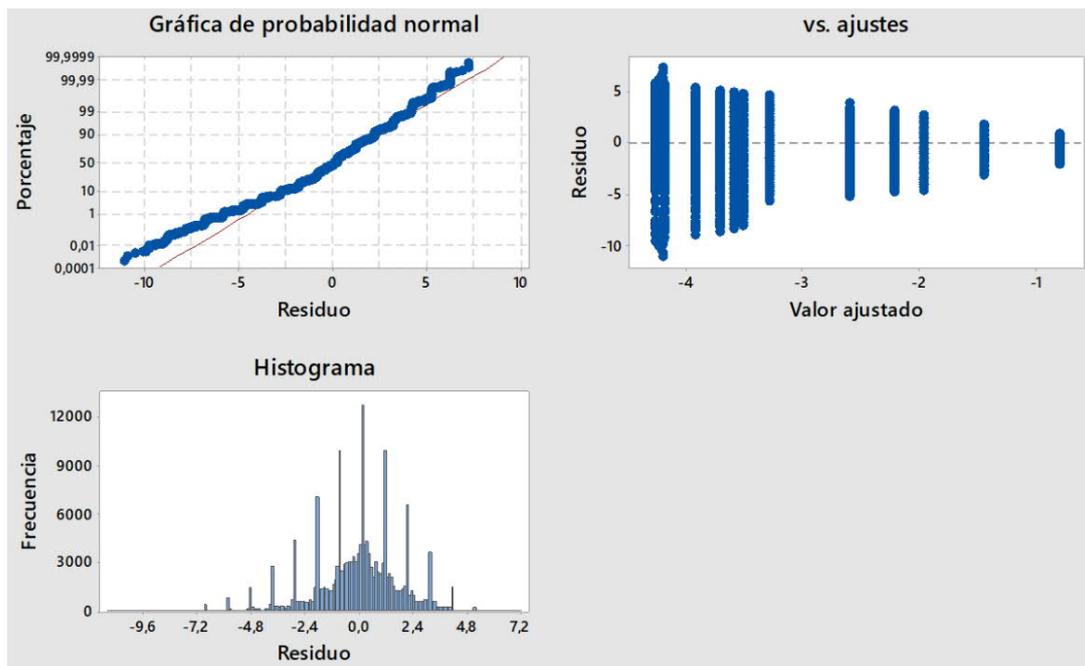
EVM 4f - EVM 9f	-1,5408	0,0283	(-1,6387; -1,4429)	-54,41	0,000
EVM 3f - EVM 9f	-1,4917	0,0286	(-1,5907; -1,3927)	-52,10	0,000
EVM 2f - EVM 9f	-1,4397	0,0289	(-1,5396; -1,3398)	-49,82	0,000
EVM 1f - EVM 9f	-1,4107	0,0290	(-1,5109; -1,3104)	-48,66	0,000
Meses retras - EVM 9f	-1,4013	0,0289	(-1,5014; -1,3013)	-48,43	0,000
EVM 7f - EVM 8f	-0,4517	0,0278	(-0,5479; -0,3555)	-16,23	0,000
EVM 6f - EVM 8f	-0,8406	0,0284	(-0,9390; -0,7423)	-29,56	0,000
EVM 5f - EVM 8f	-1,1362	0,0290	(-1,2364; -1,0360)	-39,21	0,000
EVM 4f - EVM 8f	-1,2421	0,0295	(-1,3441; -1,1401)	-42,11	0,000
EVM 3f - EVM 8f	-1,1929	0,0298	(-1,2960; -1,0899)	-40,03	0,000
EVM 2f - EVM 8f	-1,1409	0,0301	(-1,2448; -1,0370)	-37,97	0,000
EVM 1f - EVM 8f	-1,1119	0,0301	(-1,2161; -1,0077)	-36,89	0,000
Meses retras - EVM 8f	-1,1026	0,0301	(-1,2066; -0,9985)	-36,64	0,000
EVM 6f - EVM 7f	-0,3889	0,0297	(-0,4915; -0,2864)	-13,11	0,000
EVM 5f - EVM 7f	-0,6845	0,0302	(-0,7888; -0,5801)	-22,69	0,000
EVM 4f - EVM 7f	-0,7904	0,0307	(-0,8964; -0,6843)	-25,77	0,000
EVM 3f - EVM 7f	-0,7412	0,0310	(-0,8483; -0,6342)	-23,94	0,000
EVM 2f - EVM 7f	-0,6892	0,0312	(-0,7971; -0,5813)	-22,09	0,000
EVM 1f - EVM 7f	-0,6602	0,0313	(-0,7684; -0,5520)	-21,10	0,000
Meses retras - EVM 7f	-0,6509	0,0312	(-0,7589; -0,5428)	-20,83	0,000
EVM 5f - EVM 6f	-0,2955	0,0307	(-0,4018; -0,1892)	-9,61	0,000
EVM 4f - EVM 6f	-0,4014	0,0312	(-0,5094; -0,2934)	-12,85	0,000
EVM 3f - EVM 6f	-0,3523	0,0315	(-0,4613; -0,2433)	-11,18	0,000
EVM 2f - EVM 6f	-0,3003	0,0318	(-0,4101; -0,1905)	-9,46	0,000
EVM 1f - EVM 6f	-0,2713	0,0318	(-0,3814; -0,1612)	-8,52	0,000
Meses retras - EVM 6f	-0,2619	0,0318	(-0,3719; -0,1520)	-8,24	0,000
EVM 4f - EVM 5f	-0,1059	0,0317	(-0,2156; 0,0038)	-3,34	0,073
EVM 3f - EVM 5f	-0,0568	0,0320	(-0,1674; 0,0539)	-1,77	0,940
EVM 2f - EVM 5f	-0,0048	0,0322	(-0,1162; 0,1067)	-0,15	1,000
EVM 1f - EVM 5f	0,0242	0,0323	(-0,0875; 0,1360)	0,75	1,000
Meses retras - EVM 5f	0,0336	0,0323	(-0,0780; 0,1452)	1,04	1,000
EVM 3f - EVM 4f	0,0491	0,0325	(-0,0632; 0,1614)	1,51	0,986
EVM 2f - EVM 4f	0,1011	0,0327	(-0,0119; 0,2142)	3,09	0,146
EVM 1f - EVM 4f	0,1302	0,0328	(0,0168; 0,2435)	3,97	0,008

Meses retras - EVM 4f	0,1395	0,0327	(0,0263; 0,2527)	4,26	0,002
EVM 2f - EVM 3f	0,0520	0,0330	(-0,0620; 0,1660)	1,58	0,979
EVM 1f - EVM 3f	0,0810	0,0331	(-0,0333; 0,1953)	2,45	0,539
Meses retras - EVM 3f	0,0904	0,0330	(-0,0238; 0,2045)	2,74	0,331
EVM 1f - EVM 2f	0,0290	0,0333	(-0,0861; 0,1441)	0,87	1,000
Meses retras - EVM 2f	0,0384	0,0332	(-0,0766; 0,1533)	1,15	0,999
Meses retras - EVM 1f	0,0093	0,0333	(-0,1059; 0,1246)	0,28	1,000

Para los datos de CTCR, el análisis ANOVA determinó los resultados siguientes:

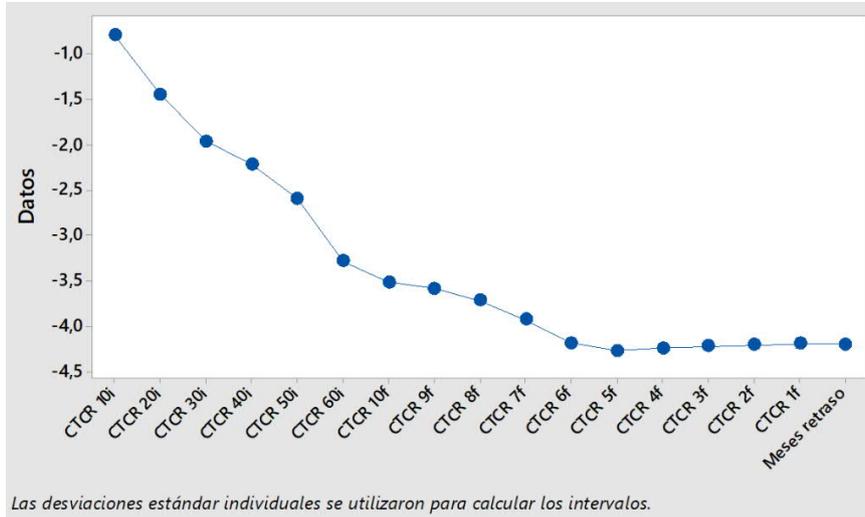
En la Figura 4-64 se presentan las gráficas de residuos obtenidas.

Figura 4-64: Gráficas de residuos para CTCR. Proyecto Cardenillo



En la Figura 4-65 se presentan los intervalos para CTCR, con el 95% de Intervalo de Confianza para la media de las variables analizadas.

Figura 4-65: Gráfica de intervalos para CTCR- 95% IC para la media. Proyecto Cardenillo



Las hipótesis para el análisis ANOVA de un solo factor son las siguientes:

- Hipótesis nula ( $H_0$ ).- Todas las medias son iguales.
- Hipótesis alternativa ( $H_A$ ).- No todas las medias son iguales.
- Nivel de significancia  $\alpha = 0,05$
- No se presupuso igualdad de varianzas para el análisis

En la Tabla 4-41 se presenta la información básica para el factor de análisis que representa el plazo pronosticado por el método CTCR en los diferentes periodos de tiempo de ejecución del proyecto.

Tabla 4-41: Información del facto para CTCR. Proyecto Cardenillo

Factor	Niveles	Valores
Factor	17	CTCR 10i; CTCR 20i; CTCR 30i; CTCR 40i; CTCR 50i; CTCR 60i; CTCR 10f; CTCR 9f; CTCR 8f; CTCR 7f; CTCR 6f; CTCR 5f; CTCR 4f; CTCR 3f; CTCR 2f; CTCR 1f; Meses retraso

En la Tabla 4-42 se presenta los resultados de la prueba de Welch, donde se tiene el “Valor p” para la toma de decisión de la prueba de hipótesis.

Tabla 4-42: Resultados de la prueba de Welch para CTCR. Proyecto Cardenillo

Fuente	GL Num	GL Den	Valor F	Valor p
Factor	16	63181,8	10164,25	0,000

Resultados del análisis de las medias del plazo pronosticado en cada periodo de análisis.- El factor es el plazo pronosticado y el IC es el intervalo de confianza de las medias del grupo. Estos intervalos de confianza son rangos de valores que probablemente contienen la media real de cada población. El porcentaje de estos intervalos de confianza que contienen el parámetro es el nivel de confianza del intervalo. En la Tabla 4-43 se presentan estos resultados.

Tabla 4-43: Resultados del análisis de medias y su IC para CTCR. Proyecto Cardenillo

Factor	N	Media	Desv.Est.	IC de 95%
CTCR 10i	10000	-0,79489	0,49679	(-0,80463; -0,78515)
CTCR 20i	10000	-1,44971	0,85789	(-1,46652; -1,43289)
CTCR 30i	10000	-1,9677	1,0828	(-1,9889; -1,9465)
CTCR 40i	10000	-2,2204	1,1840	(-2,2436; -2,1972)
CTCR 50i	10000	-2,5969	1,1971	(-2,6204; -2,5735)
CTCR 60i	10000	-3,2905	1,4679	(-3,3192; -3,2617)
CTCR 10f	10000	-3,5162	1,9041	(-3,5535; -3,4788)
CTCR 9f	10000	-3,5919	1,9989	(-3,6311; -3,5528)
CTCR 8f	10000	-3,7187	2,1236	(-3,7603; -3,6771)
CTCR 7f	10000	-3,9306	2,2378	(-3,9745; -3,8867)
CTCR 6f	10000	-4,1869	2,3146	(-4,2322; -4,1415)
CTCR 5f	10000	-4,2758	2,3422	(-4,3218; -4,2299)
CTCR 4f	10000	-4,2459	2,3431	(-4,2918; -4,2000)
CTCR 3f	10000	-4,2237	2,3618	(-4,2699; -4,1774)
CTCR 2f	10000	-4,2075	2,3722	(-4,2540; -4,1610)
CTCR 1f	10000	-4,2000	2,3684	(-4,2464; -4,1536)
Meses retraso	10000	-4,2004	2,3529	(-4,2465; -4,1543)

Comparaciones en parejas de Games-Howell.- Como se presupuso que las varianzas no son iguales, el análisis ANOVA realizó una prueba Games-Howell que permite comparar todos los pares del grupo, con control del nivel de confianza simultáneo. En la Tabla 4-44 se presentan los resultados.

Tabla 4-44: Agrupación de datos utilizando el método de Games-Howell y una confianza de 95% para CTCR. Proyecto Cardenillo

Factor	N	Media	Agrupación
CTCR 10i	10000	-0,79489	A
CTCR 20i	10000	-1,44971	B
CTCR 30i	10000	-1,9677	C
CTCR 40i	10000	-2,2204	D
CTCR 50i	10000	-2,5969	E
CTCR 60i	10000	-3,2905	F
CTCR 10f	10000	-3,5162	G
CTCR 9f	10000	-3,5919	G
CTCR 8f	10000	-3,7187	H
CTCR 7f	10000	-3,9306	I
CTCR 6f	10000	-4,1869	J
CTCR 1f	10000	-4,2000	J
Meses retraso	10000	-4,2004	J
CTCR 2f	10000	-4,2075	J
CTCR 3f	10000	-4,2237	J
CTCR 4f	10000	-4,2459	J
CTCR 5f	10000	-4,2758	J

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Los resultados presentados en la Tabla 4-44 indican que el grupo "J" demuestran medias iguales, esto corresponde a los niveles de factor: CTCR6f hasta la conclusión del proyecto, por tanto indica que el método CTCR demuestra una adecuada precisión y eficiencia desde los 6 meses previos a concluir el proyecto en adelante.

Lo dicho se puede también comprobar en las pruebas simultáneas de Games-Howell presentadas en la Tabla 4-45, donde el "Valor p" demuestra un valor superior al nivel de significancia de 0.05, y por tanto indicando una igualdad de medias para los niveles de factor de 6 meses previos a la conclusión.

Tabla 4-45: Pruebas simultáneas de Games-Howell para diferencias de las medias para CTCR. Proyecto Cardenillo

Diferencia de niveles	Diferencia de las medias	EE de diferencia	IC de 95%	Valor T	Valor p ajustado
CTCR 20i - CTCR 10i	-0,65481	0,00991	(-0,68909; -0,62054)	-66,05	0,000
CTCR 30i - CTCR 10i	-1,1728	0,0119	(-1,2140; -1,1316)	-98,45	0,000
CTCR 40i - CTCR 10i	-1,4255	0,0128	(-1,4699; -1,3811)	-111,02	0,000
CTCR 50i - CTCR 10i	-1,8020	0,0130	(-1,8469; -1,7572)	-139,04	0,000
CTCR 60i - CTCR 10i	-2,4956	0,0155	(-2,5492; -2,4420)	-161,04	0,000
CTCR 10f - CTCR 10i	-2,7213	0,0197	(-2,7893; -2,6532)	-138,29	0,000
CTCR 9f - CTCR 10i	-2,7971	0,0206	(-2,8683; -2,7258)	-135,80	0,000
CTCR 8f - CTCR 10i	-2,9238	0,0218	(-2,9992; -2,8484)	-134,06	0,000
CTCR 7f - CTCR 10i	-3,1357	0,0229	(-3,2150; -3,0564)	-136,79	0,000
CTCR 6f - CTCR 10i	-3,3920	0,0237	(-3,4738; -3,3101)	-143,29	0,000
CTCR 5f - CTCR 10i	-3,4810	0,0239	(-3,5637; -3,3982)	-145,39	0,000
CTCR 4f - CTCR 10i	-3,4510	0,0240	(-3,5338; -3,3682)	-144,08	0,000
CTCR 3f - CTCR 10i	-3,4288	0,0241	(-3,5122; -3,3453)	-142,06	0,000
CTCR 2f - CTCR 10i	-3,4126	0,0242	(-3,4964; -3,3288)	-140,80	0,000
CTCR 1f - CTCR 10i	-3,4051	0,0242	(-3,4888; -3,3214)	-140,71	0,000
Meses retras - CTCR 10i	-3,4055	0,0240	(-3,4887; -3,3224)	-141,61	0,000
CTCR 30i - CTCR 20i	-0,5180	0,0138	(-0,5658; -0,4702)	-37,50	0,000
CTCR 40i - CTCR 20i	-0,7707	0,0146	(-0,8212; -0,7201)	-52,71	0,000
CTCR 50i - CTCR 20i	-1,1472	0,0147	(-1,1982; -1,0963)	-77,90	0,000
CTCR 60i - CTCR 20i	-1,8408	0,0170	(-1,8996; -1,7820)	-108,27	0,000
CTCR 10f - CTCR 20i	-2,0665	0,0209	(-2,1387; -1,9942)	-98,95	0,000
CTCR 9f - CTCR 20i	-2,1422	0,0218	(-2,2175; -2,0670)	-98,48	0,000
CTCR 8f - CTCR 20i	-2,2690	0,0229	(-2,3482; -2,1898)	-99,07	0,000
CTCR 7f - CTCR 20i	-2,4809	0,0240	(-2,5638; -2,3980)	-103,52	0,000

Aplicación en el sector hidroenergético

CTCR 6f - CTCR 20i	-2,7372	0,0247	(-2,8225; -2,6518)	-110,89	0,000
CTCR 5f - CTCR 20i	-2,8261	0,0249	(-2,9124; -2,7399)	-113,30	0,000
CTCR 4f - CTCR 20i	-2,7962	0,0250	(-2,8825; -2,7099)	-112,06	0,000
CTCR 3f - CTCR 20i	-2,7739	0,0251	(-2,8608; -2,6871)	-110,39	0,000
CTCR 2f - CTCR 20i	-2,7578	0,0252	(-2,8450; -2,6705)	-109,32	0,000
CTCR 1f - CTCR 20i	-2,7503	0,0252	(-2,8374; -2,6632)	-109,18	0,000
Meses retras - CTCR 20i	-2,7507	0,0250	(-2,8373; -2,6641)	-109,83	0,000
CTCR 40i - CTCR 30i	-0,2527	0,0160	(-0,3081; -0,1972)	-15,75	0,000
CTCR 50i - CTCR 30i	-0,6292	0,0161	(-0,6850; -0,5734)	-38,98	0,000
CTCR 60i - CTCR 30i	-1,3228	0,0182	(-1,3858; -1,2597)	-72,52	0,000
CTCR 10f - CTCR 30i	-1,5485	0,0219	(-1,6242; -1,4727)	-70,69	0,000
CTCR 9f - CTCR 30i	-1,6242	0,0227	(-1,7028; -1,5456)	-71,45	0,000
CTCR 8f - CTCR 30i	-1,7510	0,0238	(-1,8334; -1,6686)	-73,46	0,000
CTCR 7f - CTCR 30i	-1,9629	0,0249	(-2,0488; -1,8769)	-78,96	0,000
CTCR 6f - CTCR 30i	-2,2192	0,0256	(-2,3075; -2,1308)	-86,85	0,000
CTCR 5f - CTCR 30i	-2,3081	0,0258	(-2,3974; -2,2189)	-89,45	0,000
CTCR 4f - CTCR 30i	-2,2782	0,0258	(-2,3674; -2,1889)	-88,26	0,000
CTCR 3f - CTCR 30i	-2,2559	0,0260	(-2,3458; -2,1661)	-86,83	0,000
CTCR 2f - CTCR 30i	-2,2398	0,0261	(-2,3299; -2,1496)	-85,89	0,000
CTCR 1f - CTCR 30i	-2,2323	0,0260	(-2,3223; -2,1423)	-85,72	0,000
Meses retras - CTCR 30i	-2,2327	0,0259	(-2,3223; -2,1431)	-86,20	0,000
CTCR 50i - CTCR 40i	-0,3766	0,0168	(-0,4348; -0,3184)	-22,37	0,000
CTCR 60i - CTCR 40i	-1,0701	0,0189	(-1,1353; -1,0049)	-56,75	0,000
CTCR 10f - CTCR 40i	-1,2958	0,0224	(-1,3733; -1,2183)	-57,79	0,000
CTCR 9f - CTCR 40i	-1,3716	0,0232	(-1,4519; -1,2913)	-59,04	0,000
CTCR 8f - CTCR 40i	-1,4984	0,0243	(-1,5824; -1,4143)	-61,63	0,000
CTCR 7f - CTCR 40i	-1,7102	0,0253	(-1,7978; -1,6227)	-67,55	0,000
CTCR 6f - CTCR 40i	-1,9665	0,0260	(-2,0564; -1,8766)	-75,64	0,000
CTCR 5f - CTCR 40i	-2,0555	0,0262	(-2,1462; -1,9647)	-78,32	0,000
CTCR 4f - CTCR 40i	-2,0255	0,0263	(-2,1163; -1,9348)	-77,16	0,000
CTCR 3f - CTCR 40i	-2,0033	0,0264	(-2,0946; -1,9119)	-75,83	0,000
CTCR 2f - CTCR 40i	-1,9871	0,0265	(-2,0788; -1,8954)	-74,95	0,000
CTCR 1f - CTCR 40i	-1,9796	0,0265	(-2,0712; -1,8881)	-74,76	0,000
Meses retras - CTCR 40i	-1,9800	0,0263	(-2,0711; -1,8890)	-75,17	0,000

Aplicación en el sector hidroenergético

CTCR 60i - CTCR 50i	-0,6935	0,0189	(-0,7590; -0,6280)	-36,62	0,000
CTCR 10f - CTCR 50i	-0,9192	0,0225	(-0,9970; -0,8415)	-40,87	0,000
CTCR 9f - CTCR 50i	-0,9950	0,0233	(-1,0756; -0,9144)	-42,71	0,000
CTCR 8f - CTCR 50i	-1,1218	0,0244	(-1,2061; -1,0375)	-46,02	0,000
CTCR 7f - CTCR 50i	-1,3337	0,0254	(-1,4214; -1,2459)	-52,55	0,000
CTCR 6f - CTCR 50i	-1,5899	0,0261	(-1,6800; -1,4998)	-61,02	0,000
CTCR 5f - CTCR 50i	-1,6789	0,0263	(-1,7699; -1,5880)	-63,83	0,000
CTCR 4f - CTCR 50i	-1,6490	0,0263	(-1,7399; -1,5580)	-62,67	0,000
CTCR 3f - CTCR 50i	-1,6267	0,0265	(-1,7183; -1,5352)	-61,43	0,000
CTCR 2f - CTCR 50i	-1,6105	0,0266	(-1,7024; -1,5187)	-60,61	0,000
CTCR 1f - CTCR 50i	-1,6031	0,0265	(-1,6948; -1,5113)	-60,41	0,000
Meses retras - CTCR 50i	-1,6035	0,0264	(-1,6947; -1,5122)	-60,74	0,000
CTCR 10f - CTCR 60i	-0,2257	0,0240	(-0,3088; -0,1426)	-9,39	0,000
CTCR 9f - CTCR 60i	-0,3015	0,0248	(-0,3872; -0,2157)	-12,16	0,000
CTCR 8f - CTCR 60i	-0,4282	0,0258	(-0,5175; -0,3390)	-16,59	0,000
CTCR 7f - CTCR 60i	-0,6401	0,0268	(-0,7327; -0,5476)	-23,92	0,000
CTCR 6f - CTCR 60i	-0,8964	0,0274	(-0,9912; -0,8016)	-32,71	0,000
CTCR 5f - CTCR 60i	-0,9854	0,0276	(-1,0809; -0,8898)	-35,65	0,000
CTCR 4f - CTCR 60i	-0,9554	0,0276	(-1,0510; -0,8598)	-34,56	0,000
CTCR 3f - CTCR 60i	-0,9332	0,0278	(-1,0293; -0,8370)	-33,56	0,000
CTCR 2f - CTCR 60i	-0,9170	0,0279	(-1,0135; -0,8205)	-32,87	0,000
CTCR 1f - CTCR 60i	-0,9095	0,0279	(-1,0059; -0,8132)	-32,64	0,000
Meses retras - CTCR 60i	-0,9099	0,0277	(-1,0058; -0,8140)	-32,81	0,000
CTCR 9f - CTCR 10f	-0,0758	0,0276	(-0,1712; 0,0197)	-2,74	0,326
CTCR 8f - CTCR 10f	-0,2026	0,0285	(-0,3012; -0,1039)	-7,10	0,000
CTCR 7f - CTCR 10f	-0,4144	0,0294	(-0,5160; -0,3128)	-14,10	0,000
CTCR 6f - CTCR 10f	-0,6707	0,0300	(-0,7743; -0,5671)	-22,38	0,000
CTCR 5f - CTCR 10f	-0,7597	0,0302	(-0,8641; -0,6553)	-25,17	0,000
CTCR 4f - CTCR 10f	-0,7297	0,0302	(-0,8341; -0,6253)	-24,17	0,000
CTCR 3f - CTCR 10f	-0,7075	0,0303	(-0,8124; -0,6026)	-23,32	0,000
CTCR 2f - CTCR 10f	-0,6913	0,0304	(-0,7965; -0,5861)	-22,73	0,000
CTCR 1f - CTCR 10f	-0,6838	0,0304	(-0,7889; -0,5788)	-22,50	0,000
Meses retras - CTCR 10f	-0,6842	0,0303	(-0,7889; -0,5796)	-22,61	0,000
CTCR 8f - CTCR 9f	-0,1268	0,0292	(-0,2276; -0,0259)	-4,35	0,002

Aplicación en el sector hidroenergético

CTCR 7f - CTCR 9f	-0,3386	0,0300	(-0,4424; -0,2349)	-11,29	0,000
CTCR 6f - CTCR 9f	-0,5949	0,0306	(-0,7007; -0,4892)	-19,45	0,000
CTCR 5f - CTCR 9f	-0,6839	0,0308	(-0,7904; -0,5774)	-22,21	0,000
CTCR 4f - CTCR 9f	-0,6540	0,0308	(-0,7604; -0,5475)	-21,23	0,000
CTCR 3f - CTCR 9f	-0,6317	0,0309	(-0,7387; -0,5247)	-20,42	0,000
CTCR 2f - CTCR 9f	-0,6155	0,0310	(-0,7228; -0,5083)	-19,84	0,000
CTCR 1f - CTCR 9f	-0,6081	0,0310	(-0,7152; -0,5009)	-19,62	0,000
Meses retras - CTCR 9f	-0,6085	0,0309	(-0,7152; -0,5017)	-19,71	0,000
CTCR 7f - CTCR 8f	-0,2119	0,0309	(-0,3185; -0,1052)	-6,87	0,000
CTCR 6f - CTCR 8f	-0,4682	0,0314	(-0,5768; -0,3595)	-14,90	0,000
CTCR 5f - CTCR 8f	-0,5571	0,0316	(-0,6664; -0,4478)	-17,62	0,000
CTCR 4f - CTCR 8f	-0,5272	0,0316	(-0,6365; -0,4178)	-16,67	0,000
CTCR 3f - CTCR 8f	-0,5049	0,0318	(-0,6148; -0,3951)	-15,90	0,000
CTCR 2f - CTCR 8f	-0,4888	0,0318	(-0,5988; -0,3787)	-15,35	0,000
CTCR 1f - CTCR 8f	-0,4813	0,0318	(-0,5913; -0,3713)	-15,13	0,000
Meses retras - CTCR 8f	-0,4817	0,0317	(-0,5913; -0,3721)	-15,20	0,000
CTCR 6f - CTCR 7f	-0,2563	0,0322	(-0,3676; -0,1450)	-7,96	0,000
CTCR 5f - CTCR 7f	-0,3453	0,0324	(-0,4573; -0,2332)	-10,66	0,000
CTCR 4f - CTCR 7f	-0,3153	0,0324	(-0,4273; -0,2033)	-9,73	0,000
CTCR 3f - CTCR 7f	-0,2931	0,0325	(-0,4056; -0,1806)	-9,01	0,000
CTCR 2f - CTCR 7f	-0,2769	0,0326	(-0,3896; -0,1641)	-8,49	0,000
CTCR 1f - CTCR 7f	-0,2694	0,0326	(-0,3821; -0,1568)	-8,27	0,000
Meses retras - CTCR 7f	-0,2698	0,0325	(-0,3821; -0,1575)	-8,31	0,000
CTCR 5f - CTCR 6f	-0,0890	0,0329	(-0,2028; 0,0249)	-2,70	0,354
CTCR 4f - CTCR 6f	-0,0590	0,0329	(-0,1729; 0,0549)	-1,79	0,934
CTCR 3f - CTCR 6f	-0,0368	0,0331	(-0,1511; 0,0776)	-1,11	1,000
CTCR 2f - CTCR 6f	-0,0206	0,0331	(-0,1352; 0,0940)	-0,62	1,000
CTCR 1f - CTCR 6f	-0,0131	0,0331	(-0,1276; 0,1014)	-0,40	1,000
Meses retras - CTCR 6f	-0,0135	0,0330	(-0,1277; 0,1006)	-0,41	1,000
CTCR 4f - CTCR 5f	0,0300	0,0331	(-0,0846; 0,1445)	0,90	1,000
CTCR 3f - CTCR 5f	0,0522	0,0333	(-0,0628; 0,1672)	1,57	0,980
CTCR 2f - CTCR 5f	0,0684	0,0333	(-0,0469; 0,1836)	2,05	0,822
CTCR 1f - CTCR 5f	0,0758	0,0333	(-0,0393; 0,1910)	2,28	0,672
Meses retras - CTCR 5f	0,0754	0,0332	(-0,0393; 0,1902)	2,27	0,675

CTCR 3f - CTCR 4f	0,0222	0,0333	(-0,0928; 0,1373)	0,67	1,000
CTCR 2f - CTCR 4f	0,0384	0,0333	(-0,0769; 0,1537)	1,15	0,999
CTCR 1f - CTCR 4f	0,0459	0,0333	(-0,0693; 0,1611)	1,38	0,995
Meses retras - CTCR 4f	0,0455	0,0332	(-0,0693; 0,1603)	1,37	0,995
CTCR 2f - CTCR 3f	0,0162	0,0335	(-0,0996; 0,1319)	0,48	1,000
CTCR 1f - CTCR 3f	0,0236	0,0334	(-0,0920; 0,1393)	0,71	1,000
Meses retras - CTCR 3f	0,0233	0,0333	(-0,0920; 0,1385)	0,70	1,000
CTCR 1f - CTCR 2f	0,0075	0,0335	(-0,1084; 0,1234)	0,22	1,000
Meses retras - CTCR 2f	0,0071	0,0334	(-0,1085; 0,1226)	0,21	1,000
Meses retras - CTCR 1f	-0,0004	0,0334	(-0,1158; 0,1150)	-0,01	1,000

#### 4.6.2 Estadística para el proyecto hidroeléctrico Mazar Dudas

El proyecto hidroeléctrico Mazar Dudas tiene un plazo planificado de 27 meses, y en el modelo se tienen como variables de salida la estimación del plazo en el periodo mensual 10 de iniciado el proyecto, y en los últimos 10 meses consecutivos previo a la conclusión, además el plazo de conclusión del proyecto. Como resultado del modelo, cada variable cuenta con 10,000 datos, resultando en total 120,000 datos.

##### a. Estadística descriptiva Mazar Dudas

En la Tabla 4-46 se presentan los principales estadísticos descriptivos para las siguientes variables de salida:

- Costo total de la simulación
- Mes de conclusión del proyecto según la simulación
- Número de meses retrasados a la conclusión en referencia al plazo planificado

Tabla 4-46: Datos de costos y plazos totales resultado de la simulación para el proyecto Mazar Dudas

Estadístico	Costo Total Simulación	Mes conclusión	Meses retraso
Mínimo	54.4	25.0	-8.0
Máximo	61.1	35.0	2.0
Media	57.5	29.4	-2.4
Desv.est	1.1	1.4	1.4
Varianza	1.1	2.1	2.1
Asimetría	0.2	0.4	-0.4
Curtosis	2.7	3.1	3.1
Moda	57.3	29.0	-2.0

En la Tabla 4-47 se presentan los principales estadísticos descriptivos para los datos de la variable de pronóstico de meses de retraso en los primeros periodos de ejecución del proyecto Mazar Dudas. Se presentan los datos resultantes para las metodologías EVM y CTCR.

Tabla 4-47: Meses de retraso estimados según EVM y CTCR en los periodos iniciales de ejecución del proyecto Mazar Dudas

Estadístico	EVM	CTCR
	Mes 10	Mes 10
Mínimo	-1.3	-1.8
Máximo	0.5	0.3
Media	-0.4	-0.6
Desv. est	0.2	0.3
Varianza	0.1	0.1
Asimetría	-0.1	0.0
Curtosis	2.8	2.5
Moda	-0.3	-0.5

En la Tabla 4-48 y Tabla 4-49 se presentan los principales estadísticos descriptivos para los datos de la variable de pronóstico de meses de retraso en los últimos 10 periodos de ejecución del proyecto Mazar Dudas previo a la conclusión. Se presentan los datos resultantes para las metodologías EVM y CTCR.

Tabla 4-48: Meses de retraso estimados con EVM en los últimos meses previo a la conclusión del proyecto Mazar Dudas

Estadístico	Meses de retraso (EVM) en últimos meses previo a conclusión									
	Mes 10	Mes 9	Mes 8	Mes 7	Mes 6	Mes 5	Mes 4	Mes 3	Mes 2	Mes 1
Mínimo	-4.3	-4.8	-5.2	-5.6	-5.9	-6.1	-6.2	-7.0	-7.4	-7.5
Máximo	1.0	1.3	1.5	1.4	1.5	1.6	1.6	1.7	1.7	1.7
Media	-0.8	-0.9	-1.0	-1.1	-1.2	-1.3	-1.4	-1.9	-2.2	-2.2
Desv.est	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	1.2	1.3	1.4	1.5
Varianza	0.5	0.7	0.9	1.1	1.3	1.4	1.5	1.8	2.0	2.2
Asimetría	-0.8	-0.8	-0.8	-0.7	-0.7	-0.6	-0.5	-0.5	-0.4	-0.4
Curtosis	3.8	3.7	3.7	3.6	3.6	3.3	3.1	3.1	3.0	2.9
Moda	-0.5	-0.5	-3.0	-3.5	-3.0	-3.0	-2.4	-2.2	-3.0	-1.3

Tabla 4-49: Meses de retraso estimados con CTCR en los últimos meses previo a la conclusión del proyecto Mazar Dudas

Estadístico	Meses de retraso (CTCR) en últimos meses previo a conclusión									
	Mes 10	Mes 9	Mes 8	Mes 7	Mes 6	Mes 5	Mes 4	Mes 3	Mes 2	Mes 1
Mínimo	-4.7	-5.1	-5.3	-5.5	-6.0	-6.6	-7.1	-7.4	-7.7	-7.7
Máximo	0.8	1.1	1.2	1.4	1.5	1.6	1.6	1.7	1.8	1.9
Media	-1.1	-1.1	-1.2	-1.2	-1.2	-1.3	-1.4	-1.6	-1.7	-1.9
Desv.est	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.3	1.4	1.5	1.5	1.5
Varianza	0.6	0.7	0.8	1.0	1.3	1.7	2.0	2.2	2.2	2.1
Asimetría	-0.5	-0.5	-0.6	-0.6	-0.7	-0.8	-0.8	-0.7	-0.6	-0.5
Curtosis	3.2	3.2	3.2	3.4	3.6	3.6	3.4	3.3	3.2	3.1
Moda	-1.1	-3.4	-3.9	-3.9	-3.0	-2.6	-2.6	-3.8	-2.0	-3.0

b. Prueba de varianzas iguales Mazar Dudas

Previo a proceder con el análisis ANOVA es necesario ejecutar una prueba de varianzas iguales que permita verificar justamente si existe o no igualdad entre varianzas de las variables del análisis. Según los resultados de esta prueba, se puede configurar los requerimientos de un análisis ANOVA y del software para su corrida.

Los datos cumplen los requerimientos estadísticos para realizar la prueba de varianzas iguales, estos son:

- Las variables de respuesta, es decir el pronóstico de plazos, es una variable continua.
- El tamaño de la muestra es mayor a 20. Se tienen 10,000 datos por cada variable
- Cada observación es independiente de todas las demás observaciones, debido a la aleatoriedad que maneja un modelo estocástico con simulación Monte Carlo.

El nivel simultáneo de confianza de Bonferroni utilizado es del 95%.

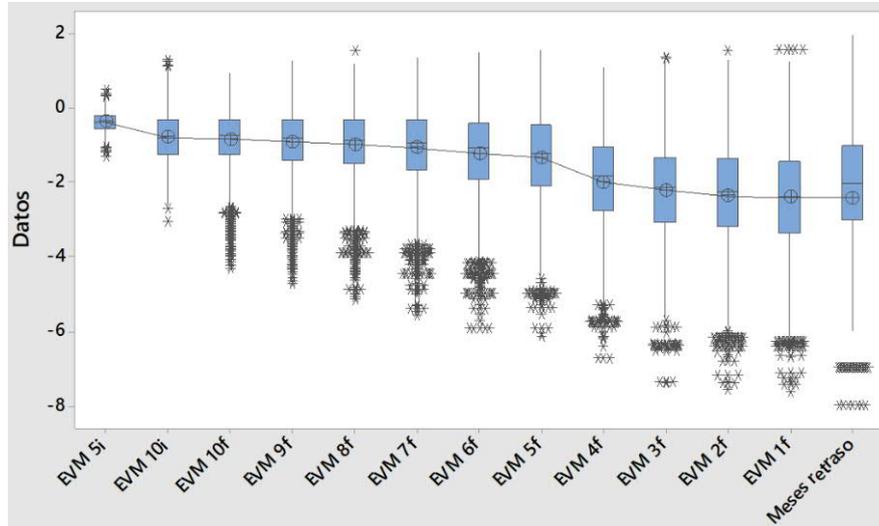
Al tratarse de datos no normales, las pruebas utilizadas son la comparación múltiple y la prueba de Levene.

Para los datos obtenidos con el método EVM, se presentaron los siguientes resultados:

En la Figura 4-66 se presenta un diagrama de caja para las variables analizadas, donde se presenta:

- “Meses retraso” que es la variable de los meses totales de retraso a la conclusión del proyecto.
- “EVM 10i” es la variable de pronóstico de plazo en el periodo de inicio del proyecto transcurridos 10 meses.
- “EVM 10f...1f” son las variables de pronóstico de plazo en los periodos de fin del proyecto en los meses: 10 meses, 9 meses... hasta 1 mes antes de concluida la ejecución del proyecto.

Figura 4-66: Gráfica de caja de las variables para EVM del proyecto Mazar Dudas



Prueba de igualdad de varianzas. Las hipótesis para una prueba de varianzas iguales son las siguientes:

- Hipótesis nula ( $H_0$ ).- La hipótesis nula indica que las varianzas son todas iguales.
- Hipótesis alternativa ( $H_A$ ).- La hipótesis alternativa indica que por lo menos una de las varianzas es diferente.
- Nivel de significancia  $\alpha = 0,05$

En la Tabla 4-50 se presentan los intervalos de confianza para las desviaciones estándar calculadas con el software Minitab® V18.

Tabla 4-50: Intervalos de confianza de Bonferroni de 95% para desviaciones estándar para EVM. Proyecto Mazar Dudas

Muestra	N	Desv.Est.	IC
EVM 5i	10000	0,24349	(0,23883; 0,24831)
EVM 10i	10000	0,66281	(0,65079; 0,67525)
EVM 10f	10000	0,73599	(0,71831; 0,75432)
EVM 9f	10000	0,82724	(0,80777; 0,84742)
EVM 8f	10000	0,92260	(0,90106; 0,94494)
EVM 7f	10000	1,02720	(1,00337; 1,05191)

EVM 6f	10000	1,13215	(1,10635; 1,15889)
EVM 5f	10000	1,17718	(1,15159; 1,20369)
EVM 4f	10000	1,23298	(1,20747; 1,25939)
EVM 3f	10000	1,33850	(1,31098; 1,36700)
EVM 2f	10000	1,42721	(1,39871; 1,45670)
EVM 1f	10000	1,47352	(1,44459; 1,50347)
Meses retraso	10000	1,44588	(1,41607; 1,47675)

Nivel de confianza individual = 99,6154%

En la Tabla 4-51 se presentan los resultados de la aplicación de las pruebas de comparaciones múltiples y Levene, donde se indican los resultados de “Valor p” para la toma de decisiones en las pruebas de hipótesis planteadas.

Tabla 4-51: resultados de las pruebas EVM para Mazar Dudas

Método	Estadística de prueba	Valor p
Comparaciones múltiples	—	0,000
Levene	1687,97	0,000

Como resultado final de la prueba de igualdad de varianzas para EVM, tenemos que el “Valor p” para los métodos de comparaciones múltiples y Levene presentan valores menores a 0.05, por tanto, se rechaza la hipótesis nula concluyendo que no existe igualdad de varianzas de las variables analizadas.

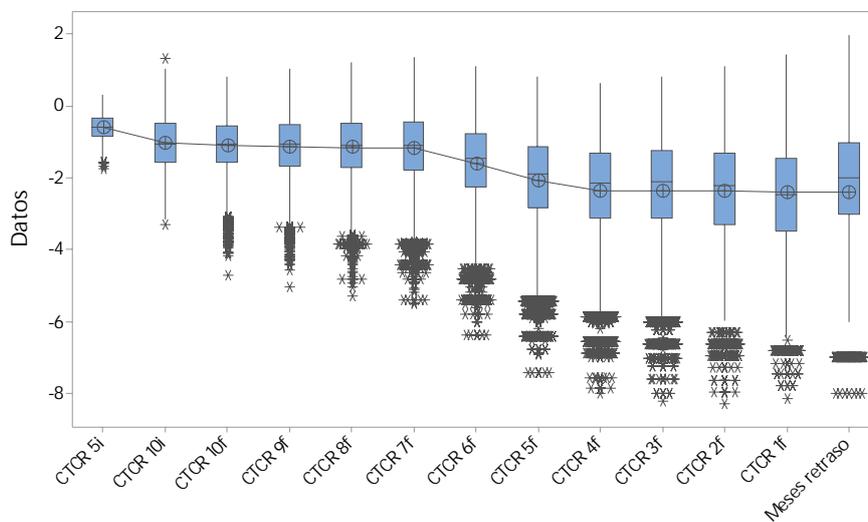
Para los datos obtenidos con el método CTCR, se presentaron los siguientes resultados:

En la Figura 4-67 se presenta un diagrama de caja para las variables analizadas, donde se presenta:

- “Meses retraso” que es la variable de los meses totales de retraso a la conclusión del proyecto.

- “CTCR 10i” es la variable de pronóstico de plazo en el periodo de inicio del proyecto transcurridos 10 meses.
- “CTCR 10f...1f” son las variables de pronóstico de plazo en los periodos de fin del proyecto en los meses: 10 meses, 9 meses... hasta 1 mes antes de concluida la ejecución del proyecto.

Figura 4-67: Gráfica de caja de las variables para CTCR para el proyecto Mazar Dudas



Prueba de igualdad de varianzas. Las hipótesis para una prueba de varianzas iguales son las siguientes:

- Hipótesis nula ( $H_0$ ).- La hipótesis nula indica que las varianzas son todas iguales.
- Hipótesis alternativa ( $H_A$ ).- La hipótesis alternativa indica que por lo menos una de las varianzas es diferente.
- Nivel de significancia  $\alpha = 0,05$

En la Tabla 4-52 se presentan los intervalos de confianza para las desviaciones estándar calculadas con el software Minitab® V18.

Tabla 4-52: Intervalos de confianza de Bonferroni de 95% para desviaciones estándar para CTCR. Proyecto Mazar Dudas

Muestra	N	Desv.Est.	IC
CTCR 5i	10000	0,33281	(0,32702; 0,33880)
CTCR 10i	10000	0,72301	(0,71054; 0,73591)
CTCR 10f	10000	0,74719	(0,73149; 0,76345)
CTCR 9f	10000	0,82201	(0,80474; 0,83990)
CTCR 8f	10000	0,90704	(0,88765; 0,92712)
CTCR 7f	10000	1,00509	(0,98276; 1,02823)
CTCR 6f	10000	1,13098	(1,10510; 1,15779)
CTCR 5f	10000	1,28607	(1,25660; 1,31660)
CTCR 4f	10000	1,41658	(1,38524; 1,44904)
CTCR 3f	10000	1,46921	(1,43732; 1,50223)
CTCR 2f	10000	1,49261	(1,46095; 1,52540)
CTCR 1f	10000	1,45698	(1,42675; 1,48828)
Meses retraso	10000	1,44588	(1,41607; 1,47675)

Nivel de confianza individual = 99,6154%

En la Tabla 4-53 se presentan los resultados de la aplicación de las pruebas de comparaciones múltiples y Levene, donde se indican los resultados de “Valor p” para la toma de decisiones en las pruebas de hipótesis planteadas.

Tabla 4-53: Resultados de las pruebas CTCR para Mazar Dudas

Método	Estadística de prueba	Valor p
Comparaciones múltiples	—	0,000
Levene	1550,97	0,000

Como resultado final de la prueba de igualdad de varianzas para CTCR, tenemos que el “Valor p” para los métodos de comparaciones múltiples y Levene presentan valores menores a 0.05, por tanto, se rechaza la hipótesis nula concluyendo que no existe igualdad de varianzas de las variables analizadas.

c. Análisis ANOVA Mazar Dudas

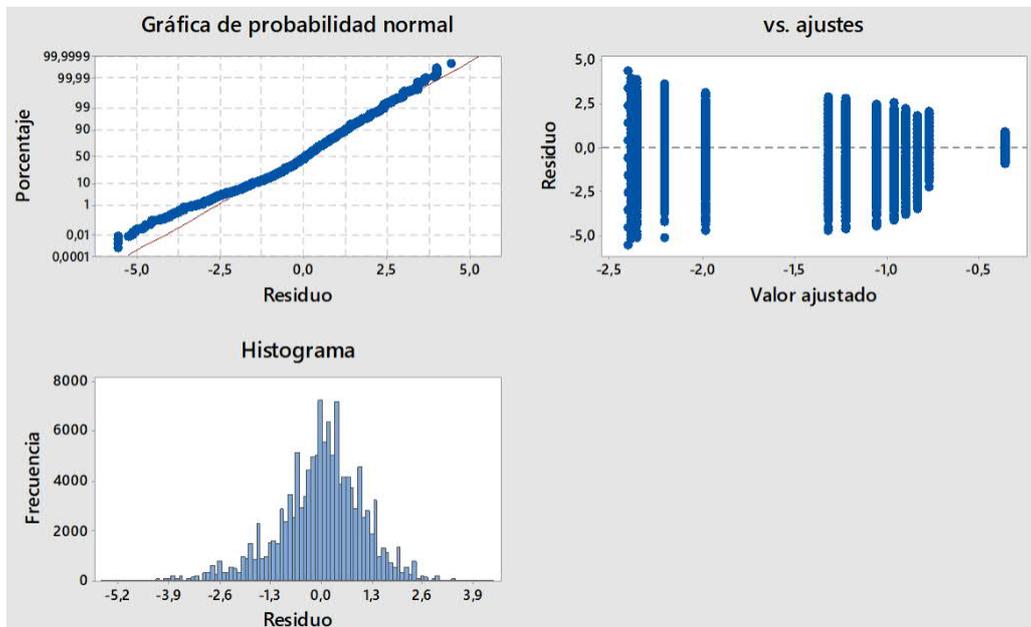
Al igual que en el caso de estudio anterior, se realizó un análisis ANOVA de un factor. El plazo pronosticado en diferentes periodos de ejecución del proyecto representa el único factor del análisis.

Por otra parte, de acuerdo al análisis de varianzas iguales realizado y presentado en el literal (b) anterior, existe diferencia de varianzas en los grupos de variables analizadas tanto para EVM como para CTCR, y por este motivo se realiza una prueba de Welch de ANOVA. Para el análisis se utilizó el software Minitab ® V18.

Para los datos de EVM, el análisis ANOVA determinó los resultados siguientes:

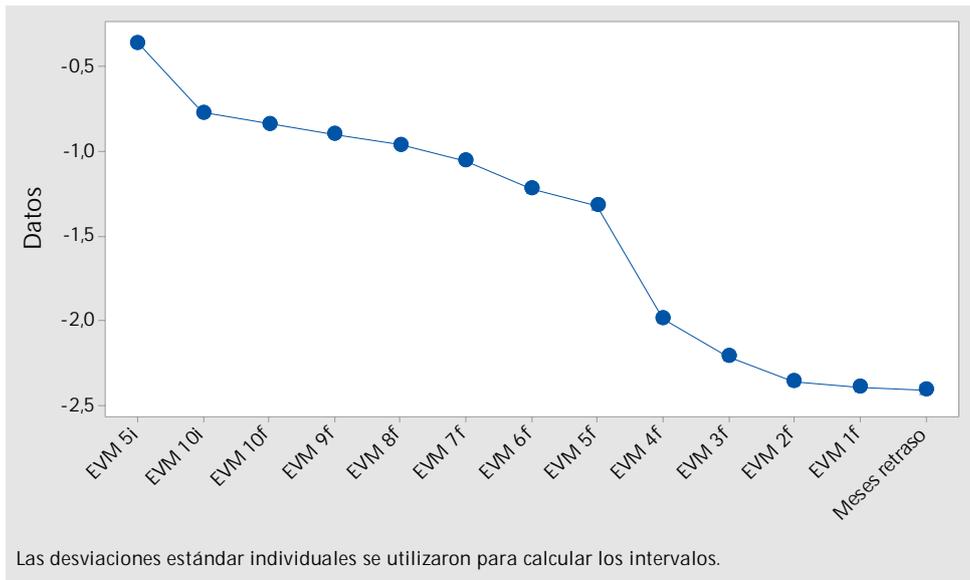
En la Figura 4-68 se presentan las gráficas de residuos obtenidas.

Figura 4-68: Gráficas de residuos para EMV de Mazar Dudas



En la Figura 4-69 se presentan los intervalos para EVM, con el 95% de Intervalo de Confianza para la media de las variables analizadas.

Figura 4-69: Gráfica de intervalos para EMV- 95% IC para la media. Proyecto Mazar Dudas



Las hipótesis para el análisis ANOVA de un solo factor son las siguientes:

- Hipótesis nula ( $H_0$ ).- Todas las medias son iguales.
- Hipótesis alternativa ( $H_A$ ).- No todas las medias son iguales.
- Nivel de significancia  $\alpha = 0,05$
- No se presupuso igualdad de varianzas para el análisis

En la Tabla 4-54 se presenta la información básica para el factor de análisis que representa el plazo pronosticado por el método EVM en los diferentes periodos de tiempo de ejecución del proyecto.

Tabla 4-54: Información del facto para EVM. Proyecto Mazar Dudas

Factor	Niveles	Valores
Factor	13	EVM 5i; EVM 10i; EVM 10f; EVM 9f; EVM 8f; EVM 7f; EVM 6f; EVM 5f; EVM 4f; EVM 3f; EVM 2f; EVM 1f; Meses retraso

En la Tabla 4-55 se presenta los resultados de la prueba de Welch, donde se tiene el “Valor p” para la toma de decisión de la prueba de hipótesis.

Tabla 4-55: Resultados de la prueba de Welch para EVM. Proyecto Mazar Dudas

Fuente	GL Num	GL Den	Valor F	Valor p
Factor	12	49274,5	7593,97	0,000

Resultados del análisis de las medias del plazo pronosticado en cada periodo de análisis. El factor es el plazo pronosticado y el IC es el intervalo de confianza de las medias del grupo. Estos intervalos de confianza son rangos de valores que probablemente contienen la media real de cada población. El porcentaje de estos intervalos de confianza que contienen el parámetro es el nivel de confianza del intervalo. En la Tabla 4-56 se presentan estos resultados.

Tabla 4-56: Resultados del análisis de medias y su IC para EVM. Proyecto Mazar Dudas

Factor	N	Media	Desv.Est.	IC de 95%
EVM 5i	10000	-0,36407	0,24349	(-0,36884; -0,35930)
EVM 10i	10000	-0,77487	0,66281	(-0,78786; -0,76188)
EVM 10f	10000	-0,84004	0,73599	(-0,85447; -0,82561)
EVM 9f	10000	-0,90091	0,82724	(-0,91713; -0,88470)
EVM 8f	10000	-0,96439	0,92260	(-0,98247; -0,94630)
EVM 7f	10000	-1,0575	1,0272	(-1,0777; -1,0374)
EVM 6f	10000	-1,2243	1,1322	(-1,2465; -1,2021)
EVM 5f	10000	-1,3216	1,1772	(-1,3447; -1,2985)
EVM 4f	10000	-1,9892	1,2330	(-2,0134; -1,9651)
EVM 3f	10000	-2,2092	1,3385	(-2,2354; -2,1829)
EVM 2f	10000	-2,3563	1,4272	(-2,3843; -2,3284)
EVM 1f	10000	-2,3892	1,4735	(-2,4181; -2,3603)
Meses retraso	10000	-2,4082	1,4459	(-2,4365; -2,3799)

Comparaciones en parejas de Games-Howell. Como se presupuso que las varianzas no son iguales, el análisis ANOVA realizó una prueba Games-Howell que permite comparar todos los pares del grupo, con control del nivel de confianza simultáneo. En la Tabla 4-57 se presentan los resultados.

Tabla 4-57: Agrupación de datos utilizando el método de Games-Howell y una confianza de 95% para EVM. Proyecto Mazar Dudas

Factor	N	Media	Agrupación
EVM 5i	10000	-0,36407	A
EVM 10i	10000	-0,77487	B
EVM 10f	10000	-0,84004	C
EVM 9f	10000	-0,90091	D
EVM 8f	10000	-0,96439	E
EVM 7f	10000	-1,0575	F
EVM 6f	10000	-1,2243	G
EVM 5f	10000	-1,3216	H
EVM 4f	10000	-1,9892	I
EVM 3f	10000	-2,2092	J
EVM 2f	10000	-2,3563	K
EVM 1f	10000	-2,3892	K
Meses retraso	10000	-2,4082	K

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Los resultados presentados en la Tabla 4-57 indican que el grupo "K" demuestran medias iguales, esto corresponde a los niveles de factor: EVM2f hasta la conclusión del proyecto, por tanto indica que el método EVM demuestra una adecuada precisión y eficiencia desde los 2 meses previos a concluir el proyecto en adelante.

Lo dicho se puede también comprobar en las pruebas simultáneas de Games-Howell presentadas en la Tabla 4-58, donde el "Valor p" demuestra un valor

superior al nivel de significancia de 0.05, y por tanto indicando una igualdad de medias para los niveles de factor de 2 meses previos a la conclusión.

Tabla 4-58: Pruebas simultáneas de Games-Howell para diferencias de las medias para EVM. Proyecto Mazar Dudas

Diferencia de niveles	Diferencia de las medias	EE de diferencia	IC de 95%	Valor T	Valor p ajustado
EVM 10i - EVM 5i	-0,41080	0,00706	(-0,43421; -0,38738)	-58,18	0,000
EVM 10f - EVM 5i	-0,47597	0,00775	(-0,50168; -0,45026)	-61,40	0,000
EVM 9f - EVM 5i	-0,53684	0,00862	(-0,56544; -0,50824)	-62,25	0,000
EVM 8f - EVM 5i	-0,60032	0,00954	(-0,63196; -0,56867)	-62,91	0,000
EVM 7f - EVM 5i	-0,6935	0,0106	(-0,7285; -0,6584)	-65,69	0,000
EVM 6f - EVM 5i	-0,8602	0,0116	(-0,8986; -0,8218)	-74,28	0,000
EVM 5f - EVM 5i	-0,9576	0,0120	(-0,9974; -0,9177)	-79,66	0,000
EVM 4f - EVM 5i	-1,6252	0,0126	(-1,6669; -1,5835)	-129,31	0,000
EVM 3f - EVM 5i	-1,8451	0,0136	(-1,8902; -1,8000)	-135,62	0,000
EVM 2f - EVM 5i	-1,9923	0,0145	(-2,0403; -1,9443)	-137,60	0,000
EVM 1f - EVM 5i	-2,0251	0,0149	(-2,0746; -1,9756)	-135,59	0,000
Meses retras - EVM 5i	-2,0441	0,0147	(-2,0928; -1,9955)	-139,41	0,000
EVM 10f - EVM 10i	-0,06517	0,00990	(-0,09802; -0,03233)	-6,58	0,000
EVM 9f - EVM 10i	-0,1260	0,0106	(-0,1612; -0,0909)	-11,89	0,000
EVM 8f - EVM 10i	-0,1895	0,0114	(-0,2272; -0,1518)	-16,68	0,000
EVM 7f - EVM 10i	-0,2827	0,0122	(-0,3232; -0,2421)	-23,12	0,000
EVM 6f - EVM 10i	-0,4494	0,0131	(-0,4929; -0,4059)	-34,26	0,000
EVM 5f - EVM 10i	-0,5468	0,0135	(-0,5916; -0,5020)	-40,47	0,000
EVM 4f - EVM 10i	-1,2144	0,0140	(-1,2608; -1,1680)	-86,75	0,000
EVM 3f - EVM 10i	-1,4343	0,0149	(-1,4839; -1,3848)	-96,03	0,000
EVM 2f - EVM 10i	-1,5815	0,0157	(-1,6337; -1,5293)	-100,50	0,000
EVM 1f - EVM 10i	-1,6143	0,0162	(-1,6679; -1,5607)	-99,91	0,000
Meses retras - EVM 10i	-1,6333	0,0159	(-1,6861; -1,5806)	-102,69	0,000
EVM 9f - EVM 10f	-0,0609	0,0111	(-0,0976; -0,0242)	-5,50	0,000
EVM 8f - EVM 10f	-0,1243	0,0118	(-0,1635; -0,0852)	-10,54	0,000
EVM 7f - EVM 10f	-0,2175	0,0126	(-0,2594; -0,1756)	-17,21	0,000
EVM 6f - EVM 10f	-0,3843	0,0135	(-0,4290; -0,3395)	-28,46	0,000

Aplicación en el sector hidroenergético

EVM 5f - EVM 10f	-0,4816	0,0139	(-0,5276; -0,4355)	-34,69	0,000
EVM 4f - EVM 10f	-1,1492	0,0144	(-1,1968; -1,1016)	-80,03	0,000
EVM 3f - EVM 10f	-1,3691	0,0153	(-1,4198; -1,3185)	-89,63	0,000
EVM 2f - EVM 10f	-1,5163	0,0161	(-1,5696; -1,4631)	-94,43	0,000
EVM 1f - EVM 10f	-1,5491	0,0165	(-1,6038; -1,4945)	-94,05	0,000
Meses retras - EVM 10f	-1,5682	0,0162	(-1,6220; -1,5144)	-96,66	0,000
EVM 8f - EVM 9f	-0,0635	0,0124	(-0,1046; -0,0224)	-5,12	0,000
EVM 7f - EVM 9f	-0,1566	0,0132	(-0,2003; -0,1129)	-11,87	0,000
EVM 6f - EVM 9f	-0,3234	0,0140	(-0,3699; -0,2769)	-23,06	0,000
EVM 5f - EVM 9f	-0,4207	0,0144	(-0,4684; -0,3730)	-29,24	0,000
EVM 4f - EVM 9f	-1,0883	0,0148	(-1,1376; -1,0391)	-73,30	0,000
EVM 3f - EVM 9f	-1,3083	0,0157	(-1,3605; -1,2561)	-83,14	0,000
EVM 2f - EVM 9f	-1,4554	0,0165	(-1,5101; -1,4007)	-88,23	0,000
EVM 1f - EVM 9f	-1,4883	0,0169	(-1,5443; -1,4322)	-88,07	0,000
Meses retras - EVM 9f	-1,5073	0,0167	(-1,5625; -1,4520)	-90,48	0,000
EVM 7f - EVM 8f	-0,0931	0,0138	(-0,1389; -0,0473)	-6,75	0,000
EVM 6f - EVM 8f	-0,2599	0,0146	(-0,3083; -0,2115)	-17,80	0,000
EVM 5f - EVM 8f	-0,3572	0,0150	(-0,4068; -0,3076)	-23,88	0,000
EVM 4f - EVM 8f	-1,0249	0,0154	(-1,0759; -0,9738)	-66,55	0,000
EVM 3f - EVM 8f	-1,2448	0,0163	(-1,2987; -1,1909)	-76,57	0,000
EVM 2f - EVM 8f	-1,3920	0,0170	(-1,4483; -1,3356)	-81,91	0,000
EVM 1f - EVM 8f	-1,4248	0,0174	(-1,4824; -1,3671)	-81,95	0,000
Meses retras - EVM 8f	-1,4438	0,0172	(-1,5007; -1,3869)	-84,18	0,000
EVM 6f - EVM 7f	-0,1668	0,0153	(-0,2175; -0,1161)	-10,91	0,000
EVM 5f - EVM 7f	-0,2641	0,0156	(-0,3159; -0,2123)	-16,90	0,000
EVM 4f - EVM 7f	-0,9317	0,0160	(-0,9849; -0,8785)	-58,06	0,000
EVM 3f - EVM 7f	-1,1517	0,0169	(-1,2076; -1,0957)	-68,26	0,000
EVM 2f - EVM 7f	-1,2988	0,0176	(-1,3571; -1,2405)	-73,86	0,000
EVM 1f - EVM 7f	-1,3317	0,0180	(-1,3912; -1,2721)	-74,14	0,000
Meses retras - EVM 7f	-1,3507	0,0177	(-1,4095; -1,2919)	-76,15	0,000
EVM 5f - EVM 6f	-0,0973	0,0163	(-0,1515; -0,0432)	-5,96	0,000
EVM 4f - EVM 6f	-0,7650	0,0167	(-0,8205; -0,7094)	-45,70	0,000
EVM 3f - EVM 6f	-0,9849	0,0175	(-1,0430; -0,9268)	-56,18	0,000
EVM 2f - EVM 6f	-1,1321	0,0182	(-1,1925; -1,0716)	-62,14	0,000

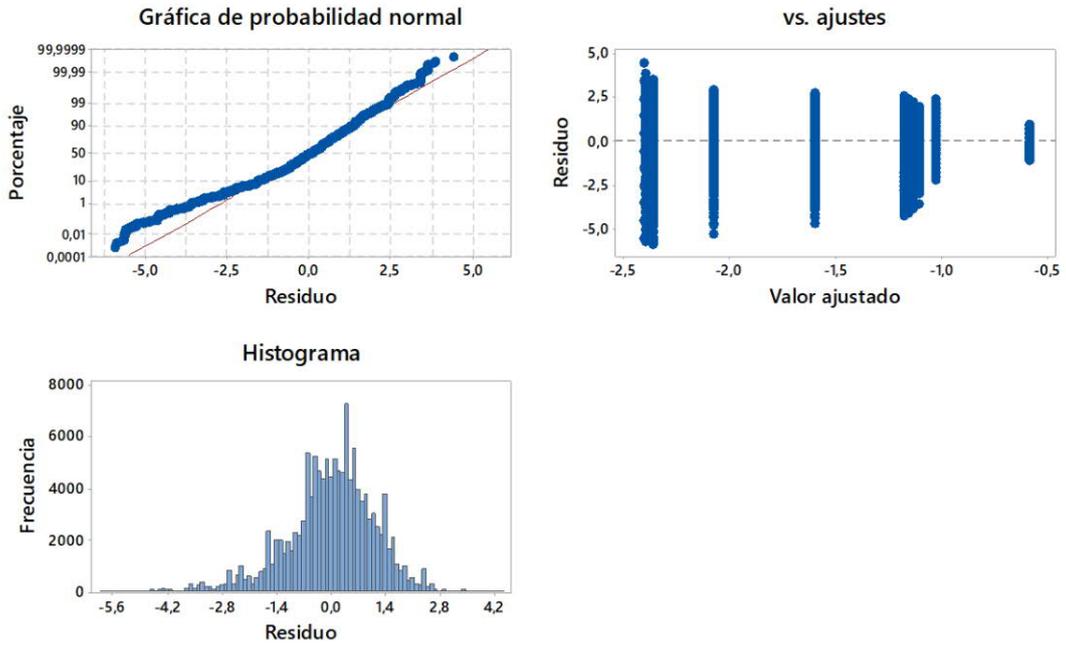
### Aplicación en el sector hidroenergético

EVM 1f - EVM 6f	-1,1649	0,0186	(-1,2265; -1,1033)	-62,69	0,000
Meses retras - EVM 6f	-1,1839	0,0184	(-1,2448; -1,1230)	-64,47	0,000
EVM 4f - EVM 5f	-0,6676	0,0170	(-0,7242; -0,6111)	-39,16	0,000
EVM 3f - EVM 5f	-0,8876	0,0178	(-0,9467; -0,8284)	-49,79	0,000
EVM 2f - EVM 5f	-1,0347	0,0185	(-1,0961; -0,9734)	-55,93	0,000
EVM 1f - EVM 5f	-1,0675	0,0189	(-1,1301; -1,0050)	-56,60	0,000
Meses retras - EVM 5f	-1,0866	0,0186	(-1,1484; -1,0247)	-58,28	0,000
EVM 3f - EVM 4f	-0,2199	0,0182	(-0,2803; -0,1596)	-12,09	0,000
EVM 2f - EVM 4f	-0,3671	0,0189	(-0,4297; -0,3046)	-19,46	0,000
EVM 1f - EVM 4f	-0,3999	0,0192	(-0,4636; -0,3362)	-20,82	0,000
Meses retras - EVM 4f	-0,4190	0,0190	(-0,4820; -0,3559)	-22,05	0,000
EVM 2f - EVM 3f	-0,1472	0,0196	(-0,2121; -0,0823)	-7,52	0,000
EVM 1f - EVM 3f	-0,1800	0,0199	(-0,2460; -0,1140)	-9,04	0,000
Meses retras - EVM 3f	-0,1990	0,0197	(-0,2644; -0,1337)	-10,10	0,000
EVM 1f - EVM 2f	-0,0328	0,0205	(-0,1009; 0,0352)	-1,60	0,930
Meses retras - EVM 2f	-0,0519	0,0203	(-0,1192; 0,0155)	-2,55	0,340
Meses retras - EVM 1f	-0,0190	0,0206	(-0,0875; 0,0494)	-0,92	0,999

Para los datos de CTCR, el análisis ANOVA determinó los resultados siguientes:

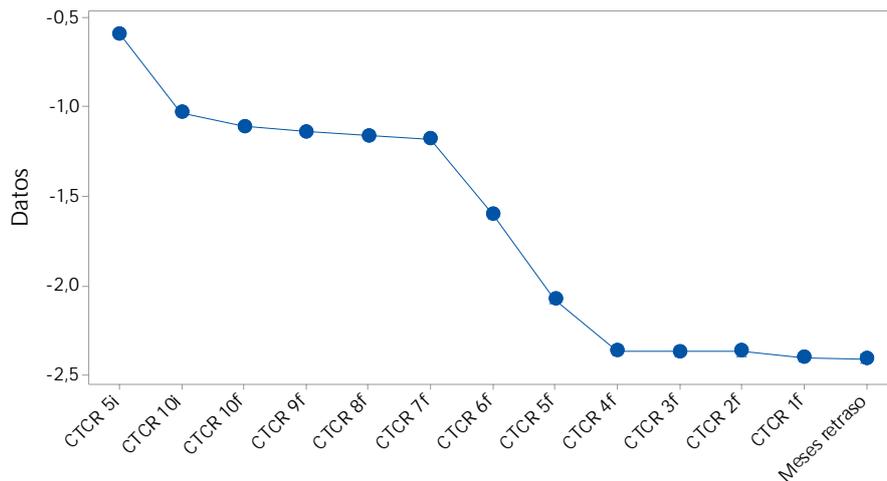
En la Figura 4-70 se presentan las gráficas de residuos obtenidas.

Figura 4-70: Gráficas de residuos para CTCR. Proyecto Mazar Dudas



En la Figura 4-71 se presentan los intervalos para CTCR, con el 95% de Intervalo de Confianza para la media de las variables analizadas.

Figura 4-71: Gráfica de intervalos para CTCR- 95% IC para la media. Proyecto Mazar Dudas



Las desviaciones estándar individuales se utilizaron para calcular los intervalos.

Las hipótesis para el análisis ANOVA de un solo factor son las siguientes:

- Hipótesis nula ( $H_0$ ).- Todas las medias son iguales.
- Hipótesis alternativa ( $H_A$ ).- No todas las medias son iguales.
- Nivel de significancia  $\alpha = 0,05$
- No se presupuso igualdad de varianzas para el análisis

En la Tabla 4-59 se presenta la información básica para el factor de análisis que representa el plazo pronosticado por el método CTCR en los diferentes periodos de tiempo de ejecución del proyecto.

Tabla 4-59: Información del facto para CTCR. Proyecto Mazar Dudas

Factor	Niveles	Valores
Factor	13	CTCR 5i; CTCR 10i; CTCR 10f; CTCR 9f; CTCR 8f; CTCR 7f; CTCR 6f; CTCR 5f; CTCR 4f; CTCR 3f; CTCR 2f; CTCR 1f; Meses retraso

En la Tabla 4-60 se presenta los resultados de la prueba de Welch, donde se tiene el "Valor p" para la toma de decisión de la prueba de hipótesis.

Tabla 4-60: Resultados de la prueba de Welch CTCR. Proyecto Mazar Dudas

Fuente	GL Num	GL Den	Valor F	Valor p
Factor	12	49844,0	5848,34	0,000

Resultados del análisis de las medias del plazo pronosticado en cada periodo de análisis. El factor es el plazo pronosticado y el IC es el intervalo de confianza de las medias del grupo. Estos intervalos de confianza son rangos de valores que probablemente contienen la media real de cada población. El porcentaje de estos intervalos de confianza que contienen el parámetro es el nivel de confianza del intervalo. En la Tabla 4-61 se presentan estos resultados.

Tabla 4-61: Resultados del análisis de medias y su IC para CTCR. Proyecto Mazar Dudas

Factor	N	Media	Desv.Est.	IC de 95%
CTCR 5i	10000	-0,58774	0,33281	(-0,59427; -0,58122)
CTCR 10i	10000	-1,02965	0,72301	(-1,04382; -1,01547)
CTCR 10f	10000	-1,10645	0,74719	(-1,12110; -1,09181)
CTCR 9f	10000	-1,13567	0,82201	(-1,15179; -1,11956)
CTCR 8f	10000	-1,15842	0,90704	(-1,17620; -1,14064)
CTCR 7f	10000	-1,1768	1,0051	(-1,1965; -1,1571)
CTCR 6f	10000	-1,6009	1,1310	(-1,6230; -1,5787)
CTCR 5f	10000	-2,0765	1,2861	(-2,1017; -2,0513)
CTCR 4f	10000	-2,3640	1,4166	(-2,3918; -2,3362)
CTCR 3f	10000	-2,3667	1,4692	(-2,3955; -2,3379)
CTCR 2f	10000	-2,3638	1,4926	(-2,3930; -2,3345)
CTCR 1f	10000	-2,3996	1,4570	(-2,4282; -2,3711)
Meses retraso	10000	-2,4082	1,4459	(-2,4365; -2,3799)

Comparaciones en parejas de Games-Howell. Como se presupuso que las varianzas no son iguales, el análisis ANOVA realizó una prueba Games-Howell que permite comparar todos los pares del grupo, con control del nivel de confianza simultáneo. En la Tabla 4-62 se presentan los resultados.

Tabla 4-62: Agrupación de datos utilizando el método de Games-Howell y una confianza de 95% para CTCR. Proyecto Mazar Dudas

Factor	N	Media	Agrupación
CTCR 5i	10000	-0,58774	A
CTCR 10i	10000	-1,02965	B
CTCR 10f	10000	-1,10645	C
CTCR 9f	10000	-1,13567	C D
CTCR 8f	10000	-1,15842	D
CTCR 7f	10000	-1,1768	D
CTCR 6f	10000	-1,6009	E
CTCR 5f	10000	-2,0765	F
CTCR 2f	10000	-2,3638	G
CTCR 4f	10000	-2,3640	G
CTCR 3f	10000	-2,3667	G
CTCR 1f	10000	-2,3996	G
Meses retraso	10000	-2,4082	G

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Los resultados presentados en la Tabla 4-62 indican que el grupo "G" demuestran medias iguales, esto corresponde a los niveles de factor: CTCR4f hasta la conclusión del proyecto, por tanto indica que el método CTCR demuestra una adecuada precisión y eficiencia desde los 4 meses previos a concluir el proyecto en adelante.

Lo dicho se puede también comprobar en las pruebas simultáneas de Games-Howell presentadas en la Tabla 4-63, donde el "Valor p" demuestra un valor superior al nivel de significancia de 0.05, y por tanto indicando una igualdad de medias para los niveles de factor de 4 meses previos a la conclusión.

Tabla 4-63: Pruebas simultáneas de Games-Howell para diferencias de las medias para CTCR. Proyecto Mazar Dudas

Diferencia de niveles	Diferencia de las medias	EE de diferencia	IC de 95%	Valor T	Valor p ajustado
CTCR 10i - CTCR 5i	-0,44190	0,00796	(-0,46830; -0,41551)	-55,52	0,000
CTCR 10f - CTCR 5i	-0,51871	0,00818	(-0,54584; -0,49158)	-63,42	0,000
CTCR 9f - CTCR 5i	-0,54793	0,00887	(-0,57734; -0,51852)	-61,79	0,000
CTCR 8f - CTCR 5i	-0,57068	0,00966	(-0,60272; -0,53863)	-59,07	0,000
CTCR 7f - CTCR 5i	-0,5890	0,0106	(-0,6241; -0,5539)	-55,63	0,000
CTCR 6f - CTCR 5i	-1,0131	0,0118	(-1,0522; -0,9740)	-85,93	0,000
CTCR 5f - CTCR 5i	-1,4887	0,0133	(-1,5328; -1,4447)	-112,07	0,000
CTCR 4f - CTCR 5i	-1,7763	0,0146	(-1,8245; -1,7280)	-122,07	0,000
CTCR 3f - CTCR 5i	-1,7789	0,0151	(-1,8289; -1,7290)	-118,09	0,000
CTCR 2f - CTCR 5i	-1,7760	0,0153	(-1,8267; -1,7253)	-116,14	0,000
CTCR 1f - CTCR 5i	-1,8119	0,0149	(-1,8614; -1,7623)	-121,24	0,000
Meses retras - CTCR 5i	-1,8205	0,0148	(-1,8697; -1,7713)	-122,70	0,000
CTCR 10f - CTCR 10i	-0,0768	0,0104	(-0,1113; -0,0423)	-7,39	0,000
CTCR 9f - CTCR 10i	-0,1060	0,0109	(-0,1423; -0,0697)	-9,69	0,000
CTCR 8f - CTCR 10i	-0,1288	0,0116	(-0,1672; -0,0903)	-11,10	0,000
CTCR 7f - CTCR 10i	-0,1471	0,0124	(-0,1882; -0,1061)	-11,88	0,000
CTCR 6f - CTCR 10i	-0,5712	0,0134	(-0,6157; -0,5267)	-42,55	0,000
CTCR 5f - CTCR 10i	-1,0468	0,0148	(-1,0958; -0,9979)	-70,95	0,000
CTCR 4f - CTCR 10i	-1,3344	0,0159	(-1,3871; -1,2816)	-83,90	0,000
CTCR 3f - CTCR 10i	-1,3370	0,0164	(-1,3913; -1,2827)	-81,65	0,000
CTCR 2f - CTCR 10i	-1,3341	0,0166	(-1,3891; -1,2791)	-80,44	0,000
CTCR 1f - CTCR 10i	-1,3700	0,0163	(-1,4239; -1,3160)	-84,23	0,000
Meses retras - CTCR 10i	-1,3786	0,0162	(-1,4322; -1,3249)	-85,28	0,000
CTCR 9f - CTCR 10f	-0,0292	0,0111	(-0,0661; 0,0076)	-2,63	0,292
CTCR 8f - CTCR 10f	-0,0520	0,0118	(-0,0909; -0,0130)	-4,42	0,001
CTCR 7f - CTCR 10f	-0,0703	0,0125	(-0,1118; -0,0288)	-5,61	0,000
CTCR 6f - CTCR 10f	-0,4944	0,0136	(-0,5394; -0,4494)	-36,47	0,000
CTCR 5f - CTCR 10f	-0,9700	0,0149	(-1,0194; -0,9207)	-65,22	0,000
CTCR 4f - CTCR 10f	-1,2575	0,0160	(-1,3107; -1,2044)	-78,52	0,000
CTCR 3f - CTCR 10f	-1,2602	0,0165	(-1,3149; -1,2055)	-76,46	0,000

Aplicación en el sector hidroenergético

CTCR 2f - CTCR 10f	-1,2573	0,0167	(-1,3127; -1,2019)	-75,32	0,000
CTCR 1f - CTCR 10f	-1,2932	0,0164	(-1,3475; -1,2389)	-78,98	0,000
Meses retras - CTCR 10f	-1,3017	0,0163	(-1,3557; -1,2478)	-79,98	0,000
CTCR 8f - CTCR 9f	-0,0227	0,0122	(-0,0633; 0,0178)	-1,86	0,820
CTCR 7f - CTCR 9f	-0,0411	0,0130	(-0,0842; 0,0020)	-3,16	0,078
CTCR 6f - CTCR 9f	-0,4652	0,0140	(-0,5115; -0,4188)	-33,27	0,000
CTCR 5f - CTCR 9f	-0,9408	0,0153	(-0,9914; -0,8902)	-61,64	0,000
CTCR 4f - CTCR 9f	-1,2283	0,0164	(-1,2826; -1,1740)	-75,00	0,000
CTCR 3f - CTCR 9f	-1,2310	0,0168	(-1,2868; -1,1752)	-73,12	0,000
CTCR 2f - CTCR 9f	-1,2281	0,0170	(-1,2846; -1,1716)	-72,07	0,000
CTCR 1f - CTCR 9f	-1,2640	0,0167	(-1,3194; -1,2085)	-75,56	0,000
Meses retras - CTCR 9f	-1,2725	0,0166	(-1,3277; -1,2174)	-76,51	0,000
CTCR 7f - CTCR 8f	-0,0183	0,0135	(-0,0632; 0,0266)	-1,36	0,980
CTCR 6f - CTCR 8f	-0,4424	0,0145	(-0,4905; -0,3944)	-30,52	0,000
CTCR 5f - CTCR 8f	-0,9181	0,0157	(-0,9703; -0,8659)	-58,34	0,000
CTCR 4f - CTCR 8f	-1,2056	0,0168	(-1,2614; -1,1498)	-71,67	0,000
CTCR 3f - CTCR 8f	-1,2082	0,0173	(-1,2655; -1,1510)	-69,98	0,000
CTCR 2f - CTCR 8f	-1,2053	0,0175	(-1,2633; -1,1474)	-69,01	0,000
CTCR 1f - CTCR 8f	-1,2412	0,0172	(-1,2981; -1,1843)	-72,32	0,000
Meses retras - CTCR 8f	-1,2498	0,0171	(-1,3064; -1,1932)	-73,22	0,000
CTCR 6f - CTCR 7f	-0,4241	0,0151	(-0,4743; -0,3739)	-28,03	0,000
CTCR 5f - CTCR 7f	-0,8997	0,0163	(-0,9539; -0,8456)	-55,12	0,000
CTCR 4f - CTCR 7f	-1,1872	0,0174	(-1,2448; -1,1296)	-68,35	0,000
CTCR 3f - CTCR 7f	-1,1899	0,0178	(-1,2489; -1,1309)	-66,84	0,000
CTCR 2f - CTCR 7f	-1,1870	0,0180	(-1,2467; -1,1273)	-65,96	0,000
CTCR 1f - CTCR 7f	-1,2229	0,0177	(-1,2816; -1,1642)	-69,09	0,000
Meses retras - CTCR 7f	-1,2314	0,0176	(-1,2898; -1,1730)	-69,93	0,000
CTCR 5f - CTCR 6f	-0,4756	0,0171	(-0,5324; -0,4188)	-27,77	0,000
CTCR 4f - CTCR 6f	-0,7631	0,0181	(-0,8233; -0,7030)	-42,10	0,000
CTCR 3f - CTCR 6f	-0,7658	0,0185	(-0,8273; -0,7043)	-41,30	0,000
CTCR 2f - CTCR 6f	-0,7629	0,0187	(-0,8250; -0,7008)	-40,74	0,000
CTCR 1f - CTCR 6f	-0,7988	0,0184	(-0,8599; -0,7376)	-43,31	0,000
Meses retras - CTCR 6f	-0,8073	0,0184	(-0,8682; -0,7465)	-43,98	0,000
CTCR 4f - CTCR 5f	-0,2875	0,0191	(-0,3510; -0,2241)	-15,03	0,000

### Aplicación en el sector hidroenergético

CTCR 3f - CTCR 5f	-0,2902	0,0195	(-0,3549; -0,2254)	-14,86	0,000
CTCR 2f - CTCR 5f	-0,2873	0,0197	(-0,3526; -0,2219)	-14,58	0,000
CTCR 1f - CTCR 5f	-0,3231	0,0194	(-0,3876; -0,2587)	-16,63	0,000
Meses retras - CTCR 5f	-0,3317	0,0194	(-0,3959; -0,2675)	-17,14	0,000
CTCR 3f - CTCR 4f	-0,0027	0,0204	(-0,0703; 0,0650)	-0,13	1,000
CTCR 2f - CTCR 4f	0,0002	0,0206	(-0,0680; 0,0685)	0,01	1,000
CTCR 1f - CTCR 4f	-0,0356	0,0203	(-0,1030; 0,0318)	-1,75	0,873
Meses retras - CTCR 4f	-0,0442	0,0202	(-0,1113; 0,0229)	-2,18	0,603
CTCR 2f - CTCR 3f	0,0029	0,0209	(-0,0665; 0,0724)	0,14	1,000
CTCR 1f - CTCR 3f	-0,0330	0,0207	(-0,1016; 0,0357)	-1,59	0,933
Meses retras - CTCR 3f	-0,0415	0,0206	(-0,1099; 0,0268)	-2,01	0,723
CTCR 1f - CTCR 2f	-0,0359	0,0209	(-0,1050; 0,0333)	-1,72	0,887
Meses retras - CTCR 2f	-0,0444	0,0208	(-0,1134; 0,0245)	-2,14	0,636
Meses retras - CTCR 1f	-0,0086	0,0205	(-0,0766; 0,0595)	-0,42	1,000

#### 4.6.3 Estadística para el proyecto hidroeléctrico Sopladora

El proyecto hidroeléctrico Sopladora tiene un plazo planificado de 47 meses, y en el modelo se tienen como variables de salida la estimación del plazo en los periodos mensuales 10, 20 y 30 de iniciado el proyecto, y en los últimos 10 meses consecutivos previo a la conclusión, además el plazo de conclusión del proyecto. Como resultado del modelo, cada variable cuenta con 10,000 datos, resultando en total 140,000 datos.

##### a. Estadística descriptiva Sopladora

En la Tabla 4-64 se presentan los principales estadísticos descriptivos para las siguientes variables de salida:

- Costo total de la simulación
- Mes de conclusión del proyecto según la simulación

- Número de meses retrasados a la conclusión en referencia al plazo planificado

Tabla 4-64: Datos de costos y plazos totales resultado de la simulación para el proyecto Sopladora

Estadístico	Costo Total Simulación	Mes conclusión	Meses retraso
Mínimo	648.8	44.0	-12.0
Máximo	737.3	59.0	3.0
Media	689.3	50.8	-3.8
Desv. est	14.5	2.2	2.2
Varianza	209.9	5.0	5.0
Asimetría	0.2	0.2	-0.2
Curtosis	2.6	2.8	2.8
Moda	681.4	50.0	-3.0

En la Tabla 4-65 se presentan los principales estadísticos descriptivos para los datos de la variable de pronóstico de meses de retraso en los primeros periodos de ejecución del proyecto Sopladora. Se presentan los datos resultantes para las metodologías EVM y CTCR.

Tabla 4-65: Meses de retraso estimados según EVM y CTCR en los periodos iniciales de ejecución del proyecto Sopladora

Estadístico	EVM			CTCR		
	Mes 10	Mes 20	Mes 30	Mes 10	Mes 20	Mes 30
Mínimo	-1.5	-2.9	-4.4	-2.0	-3.4	-4.9
Máximo	0.6	1.2	1.2	0.6	1.0	1.0
Media	-0.4	-0.7	-1.4	-0.6	-1.2	-1.6
Desv. est	0.3	0.6	0.8	0.5	0.8	0.8
Varianza	0.1	0.4	0.6	0.2	0.6	0.7
Asimetría	-0.1	-0.1	-0.3	0.1	0.1	-0.4
Curtosis	2.8	2.6	3.3	1.9	2.2	3.1
Moda	-0.3	-0.5	-1.1	-0.8	-1.0	-1.4

En la Tabla 4-66 y Tabla 4-67 se presentan los principales estadísticos descriptivos para los datos de la variable de pronóstico de meses de retraso en los últimos 10 periodos de ejecución del proyecto Sopladora previo a la conclusión. Se presentan los datos resultantes para las metodologías EVM y CTCR.

Tabla 4-66: Meses de retraso estimados con EVM en los últimos meses previo a la conclusión del proyecto Sopladora

Estadístico	Meses de retraso (EVM) en últimos meses previo a conclusión									
	Mes 10	Mes 9	Mes 8	Mes 7	Mes 6	Mes 5	Mes 4	Mes 3	Mes 2	Mes 1
Mínimo	-7.9	-8.3	-8.9	-9.3	-9.8	-10.3	-11.1	-11.5	-11.6	-11.8
Máximo	2.1	2.2	2.3	2.2	2.1	2.4	2.1	1.9	1.9	2.9
Media	-2.0	-2.2	-2.4	-2.6	-2.9	-3.2	-3.6	-4.0	-4.1	-3.9
Desv. est	1.5	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2.0	2.0	2.1	2.2
Varianza	2.1	2.4	2.6	2.9	3.2	3.5	3.9	4.1	4.3	4.7
Asimetría	-0.4	-0.4	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3
Curtosis	3.1	3.1	3.0	3.0	2.9	2.9	2.9	2.9	2.9	2.8
Moda	-4.5	-1.4	-2.2	-2.9	-3.7	-4.4	-2.2	-2.8	-2.9	-2.9

Tabla 4-67: Meses de retraso estimados con CTCR en los últimos meses previo a la conclusión del proyecto Sopladora

Estadístico	Meses de retraso (CTCR) en últimos meses previo a conclusión									
	Mes 10	Mes 9	Mes 8	Mes 7	Mes 6	Mes 5	Mes 4	Mes 3	Mes 2	Mes 1
Mínimo	-9.6	-10.1	-10.5	-11.0	-11.3	-11.6	-11.9	-12.2	-12.2	-12.1
Máximo	1.7	1.8	1.9	2.0	2.1	2.2	2.3	2.3	2.6	2.9
Media	-2.9	-3.0	-3.1	-3.3	-3.4	-3.5	-3.6	-3.7	-3.7	-3.7
Desv. est	1.7	1.8	1.9	1.9	2.0	2.1	2.1	2.2	2.2	2.2
Varianza	2.8	3.1	3.4	3.8	4.1	4.4	4.6	4.9	5.0	5.0
Asimetría	-0.4	-0.4	-0.4	-0.4	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3	-0.2	-0.2
Curtosis	3.0	3.0	2.9	2.9	2.9	2.9	2.9	2.8	2.8	2.8
Moda	-7.8	-5.3	-5.2	-6.4	-5.7	-5.0	-5.2	-3.0	-4.5	-3.3

b. Prueba de varianzas iguales Sopladora

Previo a proceder con el análisis ANOVA es necesario ejecutar una prueba de varianzas iguales que permita verificar justamente si existe o no igualdad entre

varianzas de las variables del análisis. Según los resultados de esta prueba, se puede configurar los requerimientos de un análisis ANOVA y del software para su corrida.

Los datos cumplen los requerimientos estadísticos para realizar la prueba de varianzas iguales, estos son:

- Las variables de respuesta, es decir el pronóstico de plazos, es una variable continua.
- El tamaño de la muestra es mayor a 20. Se tienen 10,000 datos por cada variable
- Cada observación es independiente de todas las demás observaciones, debido a la aleatoriedad que maneja un modelo estocástico con simulación Monte Carlo.

El nivel simultáneo de confianza de Bonferroni utilizado es del 95%.

Al tratarse de datos no normales, las pruebas utilizadas son la comparación múltiple y la prueba de Levene.

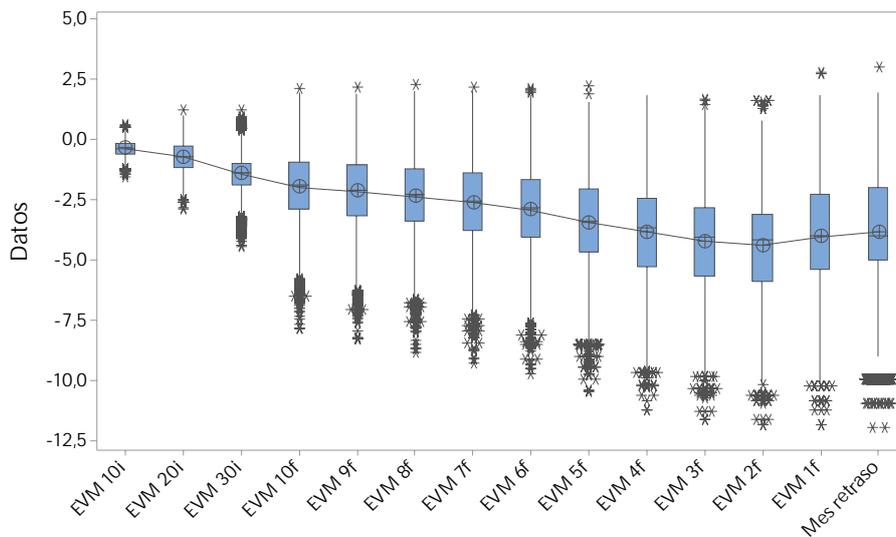
Para los datos obtenidos con el método EVM, se presentaron los siguientes resultados:

En la Figura 4-72 se presenta un diagrama de caja para las variables analizadas, donde se presenta:

- “Meses retraso” que es la variable de los meses totales de retraso a la conclusión del proyecto.
- “EVM 10i, 20i y 30i” son las variables de pronóstico de plazo en los periodos de inicio del proyecto transcurridos: 10 meses, 20 meses y 30 meses.

- “EVM 10f...1f” son las variables de pronóstico de plazo en los periodos de fin del proyecto en los meses: 10 meses, 9 meses... hasta 1 mes antes de concluida la ejecución del proyecto.

Figura 4-72: Gráfica de caja de las variables para EVM del proyecto Sopladora



Prueba de igualdad de varianzas. Las hipótesis para una prueba de varianzas iguales son las siguientes:

- Hipótesis nula ( $H_0$ ).- La hipótesis nula indica que las varianzas son todas iguales.
- Hipótesis alternativa ( $H_A$ ).- La hipótesis alternativa indica que por lo menos una de las varianzas es diferente.
- Nivel de significancia  $\alpha = 0,05$

En la Tabla 4-68 se presentan los intervalos de confianza para las desviaciones estándar calculadas con el software Minitab.

Tabla 4-68: Intervalos de confianza de Bonferroni de 95% para desviaciones estándar para EVM. Proyecto Sopladora

Muestra	N	Desv.Est.	IC
EVM 10i	10000	0,30431	(0,29848; 0,31035)
EVM 20i	10000	0,62944	(0,61801; 0,64128)
EVM 30i	10000	0,78056	(0,76372; 0,79801)
EVM 10f	10000	1,45287	(1,42287; 1,48394)
EVM 9f	10000	1,53643	(1,50487; 1,56911)
EVM 8f	10000	1,62439	(1,59130; 1,65865)
EVM 7f	10000	1,71112	(1,67663; 1,74681)
EVM 6f	10000	1,79365	(1,75782; 1,83073)
EVM 5f	10000	1,88167	(1,84419; 1,92046)
EVM 4f	10000	1,97946	(1,94022; 2,02007)
EVM 3f	10000	2,02838	(1,98843; 2,06974)
EVM 2f	10000	2,07734	(2,03643; 2,11968)
EVM 1f	10000	2,15901	(2,11695; 2,20255)
Mes retraso	10000	2,23917	(2,19584; 2,28402)

Nivel de confianza individual = 99,6429%

En la Tabla 4-69 se presentan los resultados de la aplicación de las pruebas de comparaciones múltiples y Levene, donde se indican los resultados de “Valor p” para la toma de decisiones en las pruebas de hipótesis planteadas.

Tabla 4-69: Resultados de las pruebas EVM. Proyecto Sopladora

Método	Estadística de prueba	Valor p
Comparaciones múltiples	—	0,000
Levene	2248,14	0,000

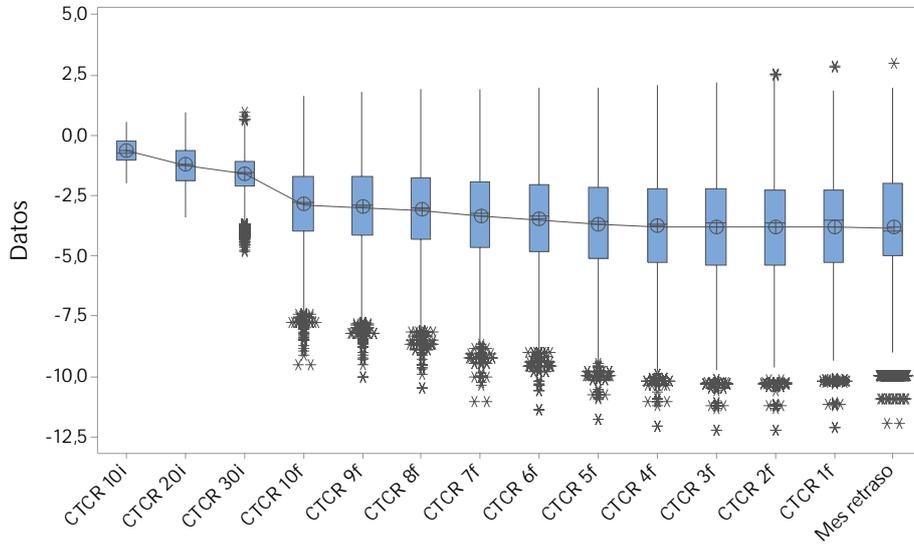
Como resultado final de la prueba de igualdad de varianzas para EVM, tenemos que el "Valor p" para los métodos de comparaciones múltiples y Levene presentan valores menores a 0.05, por tanto, se rechaza la hipótesis nula concluyendo que no existe igualdad de varianzas de las variables analizadas.

Para los datos obtenidos con el método CTCR, se presentaron los siguientes resultados:

En la Figura 4-73 se presenta un diagrama de caja para las variables analizadas, donde se presenta:

- "Meses retraso" que es la variable de los meses totales de retraso a la conclusión del proyecto.
- "CTCR 10i, 20i y 30i" son las variables de pronóstico de plazo en los periodos de inicio del proyecto transcurridos: 10 meses, 20 meses y 30 meses.
- "CTCR 10f...1f" son las variables de pronóstico de plazo en los periodos de fin del proyecto en los meses: 10 meses, 9 meses... hasta 1 mes antes de concluida la ejecución del proyecto.

Figura 4-73: Gráfica de caja de las variables para CTCR para el proyecto Sopladora



Prueba de igualdad de varianzas. Las hipótesis para una prueba de varianzas iguales son las siguientes:

- Hipótesis nula ( $H_0$ ).- La hipótesis nula indica que las varianzas son todas iguales.
- Hipótesis alternativa ( $H_A$ ).- La hipótesis alternativa indica que por lo menos una de las varianzas es diferente.
- Nivel de significancia  $\alpha = 0,05$

En la Tabla 4-70 se presentan los intervalos de confianza para las desviaciones estándar calculadas con el software Minitab® V18.

Tabla 4-70: Intervalos de confianza de Bonferroni de 95% para desviaciones estándar para CTCR. Proyecto Sopladora

Muestra	N	Desv.Est.	IC
CTCR 10i	10000	0,46059	(0,45432; 0,46708)
CTCR 20i	10000	0,78421	(0,77177; 0,79708)
CTCR 30i	10000	0,82791	(0,81057; 0,84588)
CTCR 10f	10000	1,66968	(1,63606; 1,70450)
CTCR 9f	10000	1,75921	(1,72391; 1,79576)
CTCR 8f	10000	1,85154	(1,81459; 1,88981)
CTCR 7f	10000	1,94242	(1,90387; 1,98233)
CTCR 6f	10000	2,02116	(1,98139; 2,06233)
CTCR 5f	10000	2,08696	(2,04600; 2,12935)
CTCR 4f	10000	2,14978	(2,10771; 2,19333)
CTCR 3f	10000	2,20570	(2,16283; 2,25008)
CTCR 2f	10000	2,23237	(2,18938; 2,27686)
CTCR 1f	10000	2,23478	(2,19183; 2,27924)
Mes retraso	10000	2,23917	(2,19584; 2,28402)

Nivel de confianza individual = 99,6429%

En la Tabla 4-71 se presentan los resultados de la aplicación de las pruebas de comparaciones múltiples y Levene, donde se indican los resultados de “Valor p” para la toma de decisiones en las pruebas de hipótesis planteadas.

Tabla 4-71: Resultados de las pruebas CTCR. Proyecto Sopladora

Método	Estadística de prueba	Valor p
Comparaciones múltiples	—	0,000
Levene	1892,00	0,000

Como resultado final de la prueba de igualdad de varianzas para CTCR, tenemos que el “Valor p” para los métodos de comparaciones múltiples y Levene

presentan valores menores a 0.05, por tanto, se rechaza la hipótesis nula concluyendo que no existe igualdad de varianzas de las variables analizadas.

c. Análisis ANOVA Sopladora

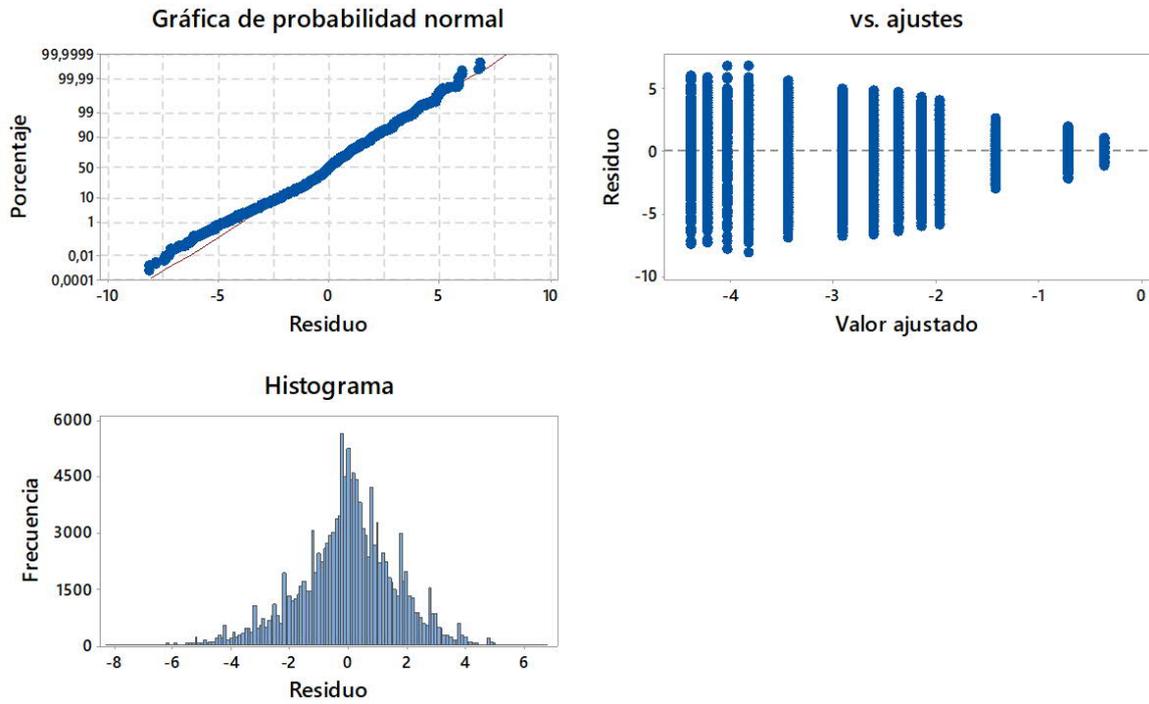
Al igual que en los casos de estudio anteriores, para el proyecto hidroeléctrico Sopladora se realizó un análisis ANOVA de un factor. El plazo pronosticado en diferentes periodos de ejecución del proyecto representa el único factor del análisis.

Por otra parte, de acuerdo al análisis de varianzas iguales realizado y presentado en el literal (b) anterior, existe diferencia de varianzas en los grupos de variables analizadas tanto para EVM como para CTCR, y por este motivo se realiza una prueba de Welch de ANOVA. Para el análisis se utilizó el software Minitab® V18.

Para los datos de EVM, el análisis ANOVA determinó los resultados siguientes:

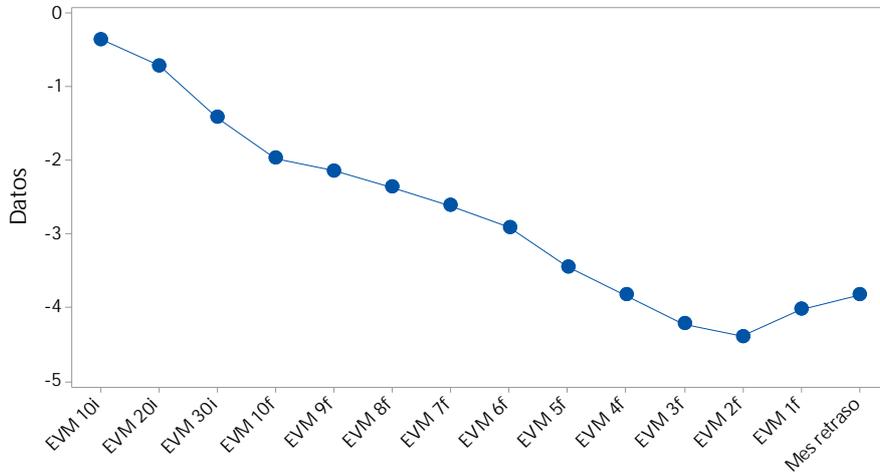
En la Figura 4-74 se presentan las gráficas de residuos obtenidas.

Figura 4-74: Gráficas de residuos para EMV. Proyecto Sopladora



En la Figura 4-75 se presentan los intervalos para EVM, con el 95% de Intervalo de Confianza para la media de las variables analizadas.

Figura 4-75: Gráfica de intervalos para EMV- 95% IC para la media. Proyecto Sopladora



Las desviaciones estándar individuales se utilizaron para calcular los intervalos.

Las hipótesis para el análisis ANOVA de un solo factor son las siguientes:

- Hipótesis nula ( $H_0$ ).- Todas las medias son iguales.
- Hipótesis alternativa ( $H_A$ ).- No todas las medias son iguales.
- Nivel de significancia  $\alpha = 0,05$
- No se presupuso igualdad de varianzas para el análisis

En la Tabla 4-72 se presenta la información básica para el factor de análisis que representa el plazo pronosticado por el método EVM en los diferentes periodos de tiempo de ejecución del proyecto.

Tabla 4-72: Información del facto para EVM. Proyecto Sopladora

Factor	Niveles	Valores
Factor	14	EVM 10i; EVM 20i; EVM 30i; EVM 10f; EVM 9f; EVM 8f; EVM 7f; EVM 6f; EVM 5f; EVM 4f; EVM 3f; EVM 2f; EVM 1f; Mes retraso

En la Tabla 4-73 se presenta los resultados de la prueba de Welch, donde se tiene el "Valor p" para la toma de decisión de la prueba de hipótesis.

Tabla 4-73: Resultados de la prueba de Welch para EVM. Proyecto Sopladora

Fuente	GL Num	GL Den	Valor F	Valor p
Factor	13	52508,2	16303,73	0,000

Resultados del análisis de las medias del plazo pronosticado en cada periodo de análisis. El factor es el plazo pronosticado y el IC es el intervalo de confianza de las medias del grupo. Estos intervalos de confianza son rangos de valores que probablemente contienen la media real de cada población. El porcentaje de estos intervalos de confianza que contienen el parámetro es el nivel de confianza del intervalo. En la Tabla 4-74 se presentan estos resultados.

Tabla 4-74: Resultados del análisis de medias y su IC para EVM. Proyecto Sopladora

Factor	N	Media	Desv.Est.	IC de 95%
EVM 10i	10000	-0,36148	0,30431	(-0,36744; -0,35551)
EVM 20i	10000	-0,71630	0,62944	(-0,72864; -0,70396)
EVM 30i	10000	-1,42198	0,78056	(-1,43728; -1,40668)
EVM 10f	10000	-1,9790	1,4529	(-2,0075; -1,9506)
EVM 9f	10000	-2,1508	1,5364	(-2,1809; -2,1207)
EVM 8f	10000	-2,3662	1,6244	(-2,3981; -2,3344)
EVM 7f	10000	-2,6223	1,7111	(-2,6558; -2,5887)
EVM 6f	10000	-2,9156	1,7936	(-2,9507; -2,8804)
EVM 5f	10000	-3,4477	1,8817	(-3,4846; -3,4109)
EVM 4f	10000	-3,8368	1,9795	(-3,8756; -3,7980)
EVM 3f	10000	-4,2329	2,0284	(-4,2727; -4,1931)
EVM 2f	10000	-4,3946	2,0773	(-4,4354; -4,3539)
EVM 1f	10000	-4,0356	2,1590	(-4,0779; -3,9932)
Mes retraso	10000	-3,8368	2,2392	(-3,8807; -3,7929)

Comparaciones en parejas de Games-Howell. Como se presupuso que las varianzas no son iguales, el análisis ANOVA realizó una prueba Games-Howell que permite comparar todos los pares del grupo, con control del nivel de confianza simultáneo. En la Tabla 4-75 se presentan los resultados.

Tabla 4-75: Agrupación de datos utilizando el método de Games-Howell y una confianza de 95% para EVM. Proyecto Sopladora

Factor	N	Media	Agrupación
EVM 10i	10000	-0,36148	A
EVM 20i	10000	-0,71630	B
EVM 30i	10000	-1,42198	C
EVM 10f	10000	-1,9790	D
EVM 9f	10000	-2,1508	E
EVM 8f	10000	-2,3662	F
EVM 7f	10000	-2,6223	G
EVM 6f	10000	-2,9156	H
EVM 5f	10000	-3,4477	I
EVM 4f	10000	-3,8368	J
Mes retraso	10000	-3,8368	J
EVM 1f	10000	-4,0356	K
EVM 3f	10000	-4,2329	L
EVM 2f	10000	-4,3946	M

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Los resultados presentados en la Tabla 4-75 indican que no existe igualdad de medias, excepto entre el nivel de factor EVM4f y los meses de retraso del modelo.

Lo dicho se puede también comprobar en las pruebas simultáneas de Games-Howell presentadas en la Tabla 4-76, donde el "Valor p" demuestra un valor superior al nivel de significancia de 0.05.

Tabla 4-76: Pruebas simultáneas de Games-Howell para diferencias de las medias para EVM. Proyecto Sopladora

Diferencia de niveles	Diferencia de las medias	EE de diferencia	IC de 95%	Valor T	Valor p ajustado
EVM 20i - EVM 10i	-0,35482	0,00699	(-0,37826; -0,33139)	-50,75	0,000
EVM 30i - EVM 10i	-1,06050	0,00838	(-1,08858; -1,03242)	-126,58	0,000
EVM 10f - EVM 10i	-1,6176	0,0148	(-1,6673; -1,5678)	-108,97	0,000

Aplicación en el sector hidroenergético

EVM 9f - EVM 10i	-1,7893	0,0157	(-1,8418; -1,7369)	-114,24	0,000
EVM 8f - EVM 10i	-2,0048	0,0165	(-2,0602; -1,9494)	-121,31	0,000
EVM 7f - EVM 10i	-2,2608	0,0174	(-2,3190; -2,2025)	-130,08	0,000
EVM 6f - EVM 10i	-2,5541	0,0182	(-2,6151; -2,4931)	-140,39	0,000
EVM 5f - EVM 10i	-3,0863	0,0191	(-3,1502; -3,0224)	-161,91	0,000
EVM 4f - EVM 10i	-3,4753	0,0200	(-3,5424; -3,4082)	-173,53	0,000
EVM 3f - EVM 10i	-3,8714	0,0205	(-3,9402; -3,8027)	-188,75	0,000
EVM 2f - EVM 10i	-4,0332	0,0210	(-4,1035; -3,9628)	-192,10	0,000
EVM 1f - EVM 10i	-3,6741	0,0218	(-3,7472; -3,6010)	-168,51	0,000
Mes retraso - EVM 10i	-3,4753	0,0226	(-3,5511; -3,3996)	-153,79	0,000
EVM 30i - EVM 20i	-0,7057	0,0100	(-0,7393; -0,6721)	-70,38	0,000
EVM 10f - EVM 20i	-1,2627	0,0158	(-1,3158; -1,2097)	-79,75	0,000
EVM 9f - EVM 20i	-1,4345	0,0166	(-1,4902; -1,3789)	-86,40	0,000
EVM 8f - EVM 20i	-1,6499	0,0174	(-1,7083; -1,5916)	-94,71	0,000
EVM 7f - EVM 20i	-1,9060	0,0182	(-1,9671; -1,8449)	-104,54	0,000
EVM 6f - EVM 20i	-2,1993	0,0190	(-2,2630; -2,1356)	-115,70	0,000
EVM 5f - EVM 20i	-2,7314	0,0198	(-2,7980; -2,6649)	-137,66	0,000
EVM 4f - EVM 20i	-3,1205	0,0208	(-3,1901; -3,0509)	-150,23	0,000
EVM 3f - EVM 20i	-3,5166	0,0212	(-3,5878; -3,4454)	-165,58	0,000
EVM 2f - EVM 20i	-3,6783	0,0217	(-3,7511; -3,6056)	-169,46	0,000
EVM 1f - EVM 20i	-3,3193	0,0225	(-3,3946; -3,2439)	-147,60	0,000
Mes retraso - EVM 20i	-3,1205	0,0233	(-3,1985; -3,0425)	-134,16	0,000
EVM 10f - EVM 30i	-0,5571	0,0165	(-0,6123; -0,5018)	-33,78	0,000
EVM 9f - EVM 30i	-0,7288	0,0172	(-0,7866; -0,6711)	-42,29	0,000
EVM 8f - EVM 30i	-0,9443	0,0180	(-1,0047; -0,8839)	-52,40	0,000
EVM 7f - EVM 30i	-1,2003	0,0188	(-1,2633; -1,1372)	-63,82	0,000
EVM 6f - EVM 30i	-1,4936	0,0196	(-1,5592; -1,4280)	-76,36	0,000
EVM 5f - EVM 30i	-2,0258	0,0204	(-2,0940; -1,9575)	-99,44	0,000
EVM 4f - EVM 30i	-2,4148	0,0213	(-2,4861; -2,3435)	-113,49	0,000
EVM 3f - EVM 30i	-2,8109	0,0217	(-2,8838; -2,7381)	-129,33	0,000
EVM 2f - EVM 30i	-2,9727	0,0222	(-3,0470; -2,8983)	-133,96	0,000
EVM 1f - EVM 30i	-2,6136	0,0230	(-2,6905; -2,5366)	-113,84	0,000
Mes retraso - EVM 30i	-2,4148	0,0237	(-2,4943; -2,3353)	-101,83	0,000
EVM 9f - EVM 10f	-0,1718	0,0211	(-0,2427; -0,1009)	-8,12	0,000

Aplicación en el sector hidroenergético

EVM 8f - EVM 10f	-0,3872	0,0218	(-0,4602; -0,3142)	-17,77	0,000
EVM 7f - EVM 10f	-0,6432	0,0224	(-0,7185; -0,5680)	-28,65	0,000
EVM 6f - EVM 10f	-0,9365	0,0231	(-1,0139; -0,8592)	-40,57	0,000
EVM 5f - EVM 10f	-1,4687	0,0238	(-1,5484; -1,3890)	-61,78	0,000
EVM 4f - EVM 10f	-1,8578	0,0246	(-1,9401; -1,7755)	-75,66	0,000
EVM 3f - EVM 10f	-2,2539	0,0250	(-2,3375; -2,1702)	-90,33	0,000
EVM 2f - EVM 10f	-2,4156	0,0253	(-2,5006; -2,3306)	-95,29	0,000
EVM 1f - EVM 10f	-2,0565	0,0260	(-2,1437; -1,9693)	-79,03	0,000
Mes retraso - EVM 10f	-1,8578	0,0267	(-1,9472; -1,7683)	-69,60	0,000
EVM 8f - EVM 9f	-0,2154	0,0224	(-0,2904; -0,1405)	-9,63	0,000
EVM 7f - EVM 9f	-0,4714	0,0230	(-0,5485; -0,3944)	-20,50	0,000
EVM 6f - EVM 9f	-0,7648	0,0236	(-0,8439; -0,6856)	-32,38	0,000
EVM 5f - EVM 9f	-1,2969	0,0243	(-1,3783; -1,2155)	-53,39	0,000
EVM 4f - EVM 9f	-1,6860	0,0251	(-1,7700; -1,6020)	-67,28	0,000
EVM 3f - EVM 9f	-2,0821	0,0254	(-2,1674; -1,9968)	-81,82	0,000
EVM 2f - EVM 9f	-2,2438	0,0258	(-2,3304; -2,1572)	-86,84	0,000
EVM 1f - EVM 9f	-1,8847	0,0265	(-1,9736; -1,7959)	-71,12	0,000
Mes retraso - EVM 9f	-1,6860	0,0272	(-1,7770; -1,5950)	-62,08	0,000
EVM 7f - EVM 8f	-0,2560	0,0236	(-0,3351; -0,1769)	-10,85	0,000
EVM 6f - EVM 8f	-0,5493	0,0242	(-0,6304; -0,4682)	-22,70	0,000
EVM 5f - EVM 8f	-1,0815	0,0249	(-1,1648; -0,9982)	-43,51	0,000
EVM 4f - EVM 8f	-1,4705	0,0256	(-1,5564; -1,3847)	-57,43	0,000
EVM 3f - EVM 8f	-1,8666	0,0260	(-1,9537; -1,7796)	-71,83	0,000
EVM 2f - EVM 8f	-2,0284	0,0264	(-2,1168; -1,9400)	-76,92	0,000
EVM 1f - EVM 8f	-1,6693	0,0270	(-1,7599; -1,5788)	-61,78	0,000
Mes retraso - EVM 8f	-1,4706	0,0277	(-1,5633; -1,3778)	-53,16	0,000
EVM 6f - EVM 7f	-0,2933	0,0248	(-0,3764; -0,2102)	-11,83	0,000
EVM 5f - EVM 7f	-0,8255	0,0254	(-0,9107; -0,7402)	-32,46	0,000
EVM 4f - EVM 7f	-1,2145	0,0262	(-1,3022; -1,1268)	-46,42	0,000
EVM 3f - EVM 7f	-1,6106	0,0265	(-1,6996; -1,5217)	-60,69	0,000
EVM 2f - EVM 7f	-1,7724	0,0269	(-1,8626; -1,6822)	-65,86	0,000
EVM 1f - EVM 7f	-1,4133	0,0275	(-1,5056; -1,3210)	-51,30	0,000
Mes retraso - EVM 7f	-1,2145	0,0282	(-1,3090; -1,1201)	-43,10	0,000
EVM 5f - EVM 6f	-0,5322	0,0260	(-0,6193; -0,4450)	-20,47	0,000

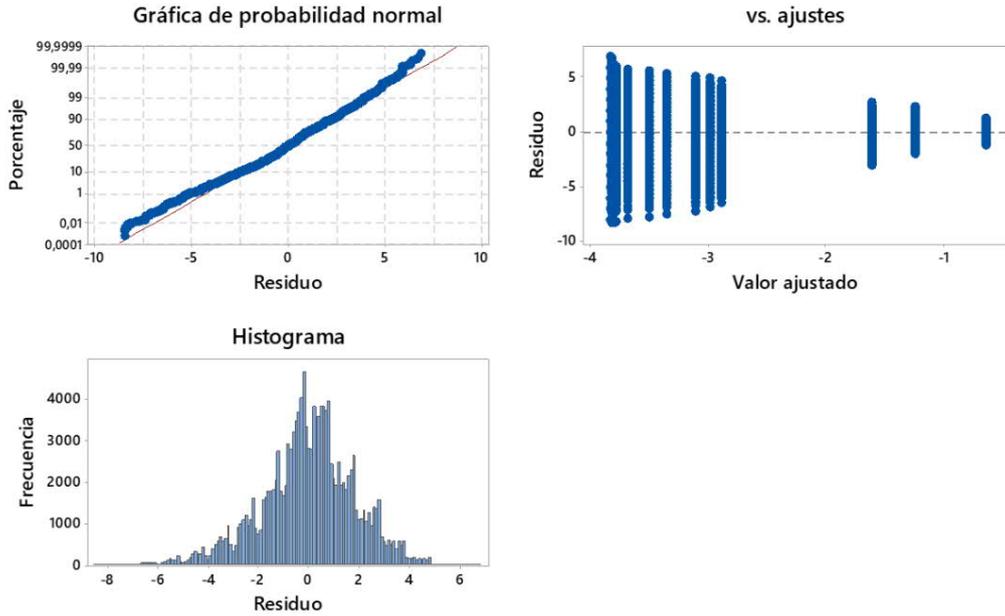
Aplicación en el sector hidroenergético

EVM 4f - EVM 6f	-0,9212	0,0267	(-1,0107; -0,8317)	-34,49	0,000
EVM 3f - EVM 6f	-1,3173	0,0271	(-1,4081; -1,2266)	-48,65	0,000
EVM 2f - EVM 6f	-1,4791	0,0274	(-1,5710; -1,3871)	-53,89	0,000
EVM 1f - EVM 6f	-1,1200	0,0281	(-1,2141; -1,0259)	-39,90	0,000
Mes retraso - EVM 6f	-0,9212	0,0287	(-1,0174; -0,8251)	-32,11	0,000
EVM 4f - EVM 5f	-0,3891	0,0273	(-0,4806; -0,2975)	-14,25	0,000
EVM 3f - EVM 5f	-0,7851	0,0277	(-0,8779; -0,6924)	-28,38	0,000
EVM 2f - EVM 5f	-0,9469	0,0280	(-1,0408; -0,8530)	-33,78	0,000
EVM 1f - EVM 5f	-0,5878	0,0286	(-0,6838; -0,4918)	-20,52	0,000
Mes retraso - EVM 5f	-0,3891	0,0292	(-0,4871; -0,2910)	-13,30	0,000
EVM 3f - EVM 4f	-0,3961	0,0283	(-0,4911; -0,3011)	-13,98	0,000
EVM 2f - EVM 4f	-0,5578	0,0287	(-0,6540; -0,4617)	-19,44	0,000
EVM 1f - EVM 4f	-0,1988	0,0293	(-0,2969; -0,1006)	-6,79	0,000
Mes retraso - EVM 4f	-0,0000	0,0299	(-0,1002; 0,1002)	-0,00	1,000
EVM 2f - EVM 3f	-0,1617	0,0290	(-0,2591; -0,0644)	-5,57	0,000
EVM 1f - EVM 3f	0,1973	0,0296	(0,0980; 0,2966)	6,66	0,000
Mes retraso - EVM 3f	0,3961	0,0302	(0,2948; 0,4974)	13,11	0,000
EVM 1f - EVM 2f	0,3591	0,0300	(0,2587; 0,4595)	11,98	0,000
Mes retraso - EVM 2f	0,5578	0,0305	(0,4555; 0,6602)	18,26	0,000
Mes retraso - EVM 1f	0,1988	0,0311	(0,0945; 0,3030)	6,39	0,000

Para los datos de CTCR, el análisis ANOVA determinó los resultados siguientes:

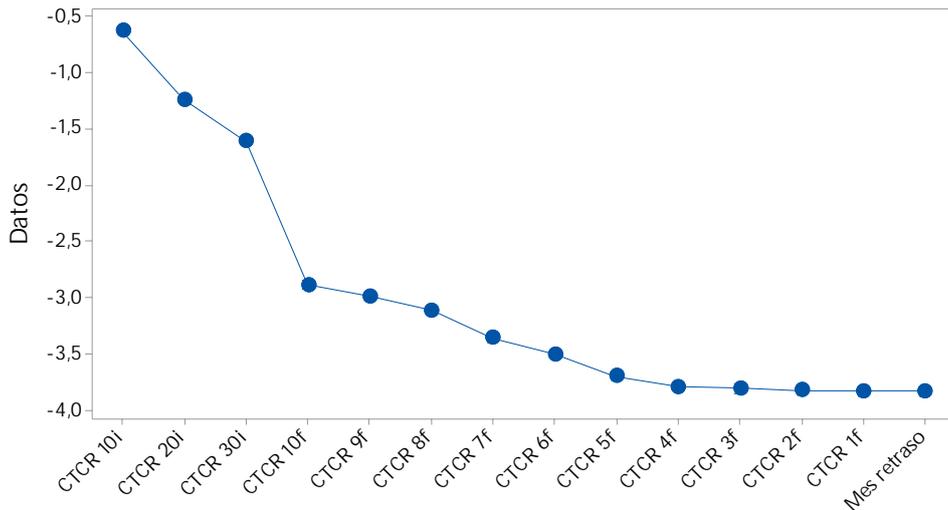
En la Figura 4-76 se presentan las gráficas de residuos obtenidas.

Figura 4-76: Gráficas de residuos para CTCR. Proyecto Sopladora



En la Figura 4-77 se presentan los intervalos para CTCR, con el 95% de Intervalo de Confianza para la media de las variables analizadas.

Figura 4-77: Gráfica de intervalos para CTCR Sopladora- 95% IC para la media. Proyecto Sopladora



Las desviaciones estándar individuales se utilizaron para calcular los intervalos.

Las hipótesis para el análisis ANOVA de un solo factor son las siguientes:

- Hipótesis nula ( $H_0$ ).- Todas las medias son iguales.
- Hipótesis alternativa ( $H_A$ ).- No todas las medias son iguales.
- Nivel de significancia  $\alpha = 0,05$
- No se presupuso igualdad de varianzas para el análisis

En la Tabla 4-77 se presenta la información básica para el factor de análisis que representa el plazo pronosticado por el método CTCR en los diferentes periodos de tiempo de ejecución del proyecto.

Tabla 4-77: Información del factor para CTCR. Proyecto Sopladora

Factor	Niveles	Valores
Factor	14	CTCR 10i; CTCR 20i; CTCR 30i; CTCR 10f; CTCR 9f; CTCR 8f; CTCR 7f; CTCR 6f; CTCR 5f; CTCR 4f; CTCR 3f; CTCR 2f; CTCR 1f; Mes retraso

En la Tabla 4-78 se presenta los resultados de la prueba de Welch, donde se tiene el "Valor p" para la toma de decisión de la prueba de hipótesis.

Tabla 4-78: Resultados de la prueba de Welch CTCR. Proyecto Sopladora

Fuente	GL Num	GL Den	Valor F	Valor p
Factor	13	53057,4	10950,10	0,000

Resultados del análisis de las medias del plazo pronosticado en cada periodo de análisis.- El factor es el plazo pronosticado y el IC es el intervalo de confianza de las medias del grupo. Estos intervalos de confianza son rangos de valores que probablemente contienen la media real de cada población. El porcentaje de estos intervalos de confianza que contienen el parámetro es el nivel de confianza del intervalo. En la Tabla 4-79 se presentan estos resultados.

Tabla 4-79: Resultados del análisis de medias y su IC para CTCR. Proyecto Sopladora

Factor	N	Media	Desv.Est.	IC de 95%
CTCR 10i	10000	-0,63734	0,46059	(-0,64637; -0,62831)
CTCR 20i	10000	-1,24617	0,78421	(-1,26154; -1,23080)
CTCR 30i	10000	-1,61858	0,82791	(-1,63481; -1,60235)
CTCR 10f	10000	-2,8890	1,6697	(-2,9217; -2,8563)
CTCR 9f	10000	-2,9946	1,7592	(-3,0291; -2,9601)
CTCR 8f	10000	-3,1193	1,8515	(-3,1556; -3,0830)
CTCR 7f	10000	-3,3651	1,9424	(-3,4032; -3,3271)
CTCR 6f	10000	-3,5058	2,0212	(-3,5455; -3,4662)
CTCR 5f	10000	-3,7005	2,0870	(-3,7414; -3,6596)
CTCR 4f	10000	-3,7944	2,1498	(-3,8365; -3,7522)
CTCR 3f	10000	-3,8112	2,2057	(-3,8544; -3,7679)
CTCR 2f	10000	-3,8293	2,2324	(-3,8731; -3,7855)
CTCR 1f	10000	-3,8317	2,2348	(-3,8755; -3,7879)
Mes retraso	10000	-3,8368	2,2392	(-3,8807; -3,7929)

Comparaciones en parejas de Games-Howell. Como se presupuso que las varianzas no son iguales, el análisis ANOVA realizó una prueba Games-Howell que permite comparar todos los pares del grupo, con control del nivel de confianza simultáneo. En la Tabla 4-80 se presentan los resultados.

Tabla 4-80: Agrupación de datos utilizando el método de Games-Howell y una confianza de 95% para CTCR. Proyecto Sopladora

Factor	N	Media	Agrupación
CTCR 10i	10000	-0,63734	A
CTCR 20i	10000	-1,24617	B
CTCR 30i	10000	-1,61858	C
CTCR 10f	10000	-2,8890	D
CTCR 9f	10000	-2,9946	E
CTCR 8f	10000	-3,1193	F
CTCR 7f	10000	-3,3651	G
CTCR 6f	10000	-3,5058	H
CTCR 5f	10000	-3,7005	I
CTCR 4f	10000	-3,7944	I J
CTCR 3f	10000	-3,8112	J
CTCR 2f	10000	-3,8293	J
CTCR 1f	10000	-3,8317	J
Mes retraso	10000	-3,8368	J

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Los resultados presentados en la Tabla 4-80 indican que el grupo “J” demuestran medias iguales, esto corresponde a los niveles de factor: CTCR4f hasta la conclusión del proyecto, por tanto, indica que el método CTCR demuestra una adecuada precisión y eficiencia desde los 4 meses previos a concluir el proyecto en adelante.

Lo dicho se puede también comprobar en las pruebas simultáneas de Games-Howell presentadas en la Tabla 4-81, donde el “Valor p” demuestra un valor superior al nivel de significancia de 0.05, y por tanto indicando una igualdad de medias para los niveles de factor de 4 meses previos a la conclusión.

Tabla 4-81: Pruebas simultáneas de Games-Howell para diferencias de las medias para CTCR. Proyecto Sopladora

Diferencia de niveles	Diferencia de las medias	EE de diferencia	IC de 95%	Valor T	Valor p ajustado
CTCR 20i - CTCR 10i	-0,60883	0,00909	(-0,63931; -0,57835)	-66,94	0,000
CTCR 30i - CTCR 10i	-0,98124	0,00947	(-1,01299; -0,94948)	-103,57	0,000
CTCR 10f - CTCR 10i	-2,2516	0,0173	(-2,3097; -2,1936)	-130,00	0,000
CTCR 9f - CTCR 10i	-2,3572	0,0182	(-2,4182; -2,2963)	-129,63	0,000
CTCR 8f - CTCR 10i	-2,4820	0,0191	(-2,5459; -2,4180)	-130,08	0,000
CTCR 7f - CTCR 10i	-2,7278	0,0200	(-2,7947; -2,6609)	-136,64	0,000
CTCR 6f - CTCR 10i	-2,8685	0,0207	(-2,9380; -2,7990)	-138,38	0,000
CTCR 5f - CTCR 10i	-3,0632	0,0214	(-3,1348; -2,9915)	-143,33	0,000
CTCR 4f - CTCR 10i	-3,1570	0,0220	(-3,2307; -3,0833)	-143,60	0,000
CTCR 3f - CTCR 10i	-3,1738	0,0225	(-3,2494; -3,0983)	-140,85	0,000
CTCR 2f - CTCR 10i	-3,1920	0,0228	(-3,2684; -3,1156)	-140,04	0,000
CTCR 1f - CTCR 10i	-3,1944	0,0228	(-3,2709; -3,1179)	-140,00	0,000
Mes retraso - CTCR 10i	-3,1995	0,0229	(-3,2761; -3,1228)	-139,96	0,000
CTCR 30i - CTCR 20i	-0,3724	0,0114	(-0,4106; -0,3342)	-32,66	0,000
CTCR 10f - CTCR 20i	-1,6428	0,0184	(-1,7046; -1,5810)	-89,06	0,000
CTCR 9f - CTCR 20i	-1,7484	0,0193	(-1,8130; -1,6839)	-90,78	0,000
CTCR 8f - CTCR 20i	-1,8731	0,0201	(-1,9405; -1,8057)	-93,16	0,000
CTCR 7f - CTCR 20i	-2,1190	0,0209	(-2,1892; -2,0487)	-101,16	0,000
CTCR 6f - CTCR 20i	-2,2597	0,0217	(-2,3323; -2,1870)	-104,23	0,000
CTCR 5f - CTCR 20i	-2,4543	0,0223	(-2,5291; -2,3796)	-110,09	0,000
CTCR 4f - CTCR 20i	-2,5482	0,0229	(-2,6249; -2,4715)	-111,36	0,000
CTCR 3f - CTCR 20i	-2,5650	0,0234	(-2,6435; -2,4865)	-109,57	0,000
CTCR 2f - CTCR 20i	-2,5831	0,0237	(-2,6624; -2,5038)	-109,17	0,000
CTCR 1f - CTCR 20i	-2,5856	0,0237	(-2,6649; -2,5062)	-109,17	0,000
Mes retraso - CTCR 20i	-2,5906	0,0237	(-2,6702; -2,5111)	-109,19	0,000
CTCR 10f - CTCR 30i	-1,2704	0,0186	(-1,3329; -1,2079)	-68,17	0,000
CTCR 9f - CTCR 30i	-1,3760	0,0194	(-1,4412; -1,3108)	-70,77	0,000
CTCR 8f - CTCR 30i	-1,5007	0,0203	(-1,5687; -1,4327)	-73,99	0,000
CTCR 7f - CTCR 30i	-1,7465	0,0211	(-1,8173; -1,6758)	-82,72	0,000
CTCR 6f - CTCR 30i	-1,8873	0,0218	(-1,9605; -1,8141)	-86,41	0,000

Aplicación en el sector hidroenergético

CTCR 5f - CTCR 30i	-2,0819	0,0225	(-2,1572; -2,0067)	-92,73	0,000
CTCR 4f - CTCR 30i	-2,1758	0,0230	(-2,2530; -2,0986)	-94,45	0,000
CTCR 3f - CTCR 30i	-2,1926	0,0236	(-2,2716; -2,1136)	-93,07	0,000
CTCR 2f - CTCR 30i	-2,2107	0,0238	(-2,2905; -2,1309)	-92,85	0,000
CTCR 1f - CTCR 30i	-2,2131	0,0238	(-2,2930; -2,1333)	-92,86	0,000
Mes retraso - CTCR 30i	-2,2182	0,0239	(-2,2982; -2,1382)	-92,92	0,000
CTCR 9f - CTCR 10f	-0,1056	0,0243	(-0,1869; -0,0243)	-4,35	0,001
CTCR 8f - CTCR 10f	-0,2303	0,0249	(-0,3139; -0,1468)	-9,24	0,000
CTCR 7f - CTCR 10f	-0,4761	0,0256	(-0,5620; -0,3903)	-18,59	0,000
CTCR 6f - CTCR 10f	-0,6169	0,0262	(-0,7047; -0,5290)	-23,53	0,000
CTCR 5f - CTCR 10f	-0,8115	0,0267	(-0,9011; -0,7219)	-30,36	0,000
CTCR 4f - CTCR 10f	-0,9054	0,0272	(-0,9966; -0,8142)	-33,26	0,000
CTCR 3f - CTCR 10f	-0,9222	0,0277	(-1,0149; -0,8295)	-33,34	0,000
CTCR 2f - CTCR 10f	-0,9403	0,0279	(-1,0338; -0,8469)	-33,73	0,000
CTCR 1f - CTCR 10f	-0,9427	0,0279	(-1,0362; -0,8492)	-33,79	0,000
Mes retraso - CTCR 10f	-0,9478	0,0279	(-1,0414; -0,8542)	-33,93	0,000
CTCR 8f - CTCR 9f	-0,1247	0,0255	(-0,2103; -0,0391)	-4,88	0,000
CTCR 7f - CTCR 9f	-0,3705	0,0262	(-0,4584; -0,2827)	-14,14	0,000
CTCR 6f - CTCR 9f	-0,5113	0,0268	(-0,6011; -0,4214)	-19,08	0,000
CTCR 5f - CTCR 9f	-0,7059	0,0273	(-0,7974; -0,6144)	-25,86	0,000
CTCR 4f - CTCR 9f	-0,7998	0,0278	(-0,8929; -0,7067)	-28,79	0,000
CTCR 3f - CTCR 9f	-0,8166	0,0282	(-0,9111; -0,7220)	-28,94	0,000
CTCR 2f - CTCR 9f	-0,8347	0,0284	(-0,9300; -0,7395)	-29,37	0,000
CTCR 1f - CTCR 9f	-0,8371	0,0284	(-0,9325; -0,7418)	-29,43	0,000
Mes retraso - CTCR 9f	-0,8422	0,0285	(-0,9377; -0,7468)	-29,58	0,000
CTCR 7f - CTCR 8f	-0,2458	0,0268	(-0,3358; -0,1559)	-9,16	0,000
CTCR 6f - CTCR 8f	-0,3865	0,0274	(-0,4784; -0,2947)	-14,10	0,000
CTCR 5f - CTCR 8f	-0,5812	0,0279	(-0,6747; -0,4877)	-20,83	0,000
CTCR 4f - CTCR 8f	-0,6751	0,0284	(-0,7702; -0,5800)	-23,79	0,000
CTCR 3f - CTCR 8f	-0,6919	0,0288	(-0,7884; -0,5953)	-24,02	0,000
CTCR 2f - CTCR 8f	-0,7100	0,0290	(-0,8072; -0,6128)	-24,48	0,000
CTCR 1f - CTCR 8f	-0,7124	0,0290	(-0,8097; -0,6151)	-24,55	0,000
Mes retraso - CTCR 8f	-0,7175	0,0291	(-0,8149; -0,6201)	-24,69	0,000
CTCR 6f - CTCR 7f	-0,1407	0,0280	(-0,2347; -0,0468)	-5,02	0,000

Aplicación en el sector hidroenergético

---

CTCR 5f - CTCR 7f	-0,3354	0,0285	(-0,4309; -0,2398)	-11,76	0,000
CTCR 4f - CTCR 7f	-0,4293	0,0290	(-0,5264; -0,3321)	-14,82	0,000
CTCR 3f - CTCR 7f	-0,4460	0,0294	(-0,5446; -0,3475)	-15,18	0,000
CTCR 2f - CTCR 7f	-0,4642	0,0296	(-0,5634; -0,3650)	-15,69	0,000
CTCR 1f - CTCR 7f	-0,4666	0,0296	(-0,5658; -0,3674)	-15,76	0,000
Mes retraso - CTCR 7f	-0,4717	0,0296	(-0,5710; -0,3723)	-15,91	0,000
CTCR 5f - CTCR 6f	-0,1947	0,0291	(-0,2920; -0,0973)	-6,70	0,000
CTCR 4f - CTCR 6f	-0,2885	0,0295	(-0,3874; -0,1896)	-9,78	0,000
CTCR 3f - CTCR 6f	-0,3053	0,0299	(-0,4056; -0,2051)	-10,21	0,000
CTCR 2f - CTCR 6f	-0,3235	0,0301	(-0,4244; -0,2225)	-10,74	0,000
CTCR 1f - CTCR 6f	-0,3259	0,0301	(-0,4269; -0,2249)	-10,81	0,000
Mes retraso - CTCR 6f	-0,3310	0,0302	(-0,4321; -0,2299)	-10,97	0,000
CTCR 4f - CTCR 5f	-0,0939	0,0300	(-0,1943; 0,0066)	-3,13	0,096
CTCR 3f - CTCR 5f	-0,1107	0,0304	(-0,2124; -0,0089)	-3,64	0,019
CTCR 2f - CTCR 5f	-0,1288	0,0306	(-0,2312; -0,0264)	-4,21	0,002
CTCR 1f - CTCR 5f	-0,1312	0,0306	(-0,2337; -0,0287)	-4,29	0,001
Mes retraso - CTCR 5f	-0,1363	0,0306	(-0,2389; -0,0337)	-4,45	0,001
CTCR 3f - CTCR 4f	-0,0168	0,0308	(-0,1200; 0,0864)	-0,55	1,000
CTCR 2f - CTCR 4f	-0,0349	0,0310	(-0,1388; 0,0689)	-1,13	0,998
CTCR 1f - CTCR 4f	-0,0373	0,0310	(-0,1413; 0,0666)	-1,20	0,996
Mes retraso - CTCR 4f	-0,0424	0,0310	(-0,1465; 0,0616)	-1,37	0,986
CTCR 2f - CTCR 3f	-0,0181	0,0314	(-0,1233; 0,0871)	-0,58	1,000
CTCR 1f - CTCR 3f	-0,0205	0,0314	(-0,1258; 0,0847)	-0,65	1,000
Mes retraso - CTCR 3f	-0,0256	0,0314	(-0,1310; 0,0797)	-0,82	1,000
CTCR 1f - CTCR 2f	-0,0024	0,0316	(-0,1083; 0,1035)	-0,08	1,000
Mes retraso - CTCR 2f	-0,0075	0,0316	(-0,1135; 0,0985)	-0,24	1,000
Mes retraso - CTCR 1f	-0,0051	0,0316	(-0,1111; 0,1010)	-0,16	1,000

---

#### 4.6.4 Estadística para el proyecto hidroeléctrico Santiago

El proyecto hidroeléctrico Santiago tiene un plazo planificado de 68 meses, y en el modelo se tienen como variables de salida la estimación del plazo en los periodos mensuales 10, 20, 30, 40, 50 y 60 de iniciado el proyecto, y en los últimos 10 meses consecutivos previo a la conclusión, además el plazo de conclusión del proyecto. Como resultado del modelo, cada variable cuenta con 10,000 datos, resultando en total 170,000 datos.

##### a. Estadística descriptiva Santiago

En la Tabla 4-82 se presentan los principales estadísticos descriptivos para las siguientes variables de salida:

- Costo total de la simulación
- Mes de conclusión del proyecto según la simulación
- Número de meses retrasados a la conclusión en referencia al plazo planificado

Tabla 4-82: Datos de costos y plazos totales resultado de la simulación para el proyecto Santiago

Estadístico	Costo Total Simulación	Mes conclusión	Meses retraso
Mínimo	2548.8	64.0	-17.0
Máximo	2935.5	85.0	4.0
Media	2729.1	72.7	-4.7
Desv. est	63.6	3.0	3.0
Varianza	4048.7	8.8	8.8
Asimetría	0.2	0.4	-0.4
Curtosis	2.6	3.1	3.1
Moda	2742.3	72.0	-4.0

En la Tabla 4-83 se presentan los principales estadísticos descriptivos para los datos de la variable de pronóstico de meses de retraso en los primeros periodos de ejecución del proyecto Santiago. Se presentan los datos resultantes para las metodologías EVM y CTCR.

Tabla 4-83: Meses de retraso estimados según EVM y CTCR en los periodos iniciales de ejecución del proyecto Santiago

Estadístico	EVM						CTCR					
	M10	M20	M30	M40	M50	M60	M10	M20	M30	M40	M50	M60
Mínimo	-2.0	-3.2	-3.6	-5.5	-7.5	-9.4	-2.4	-3.0	-4.2	-6.5	-8.4	-10.6
Máximo	0.7	1.0	1.2	2.2	2.7	3.8	0.6	0.9	1.2	2.0	2.6	3.8
Media	-0.4	-0.9	-1.2	-1.6	-2.1	-2.4	-0.5	-0.9	-1.6	-2.4	-3.0	-3.5
Desv. est	0.4	0.7	0.6	1.1	1.7	2.2	0.5	0.6	0.8	1.3	1.8	2.4
Varianza	0.2	0.5	0.4	1.1	2.9	4.6	0.2	0.3	0.6	1.8	3.4	5.8
Asimetría	-0.3	-0.7	-0.1	0.1	-0.2	-0.1	-0.5	-0.3	0.2	0.2	0.3	0.0
Curtosis	2.9	2.8	3.1	2.8	2.5	2.6	3.0	2.8	2.8	2.7	2.4	2.5
Moda	-0.6	-0.4	-0.9	-1.8	-2.0	-3.4	-0.8	-1.0	-1.6	-2.0	-4.2	-1.0

En la Tabla 4-84 y Tabla 4-85 se presentan los principales estadísticos descriptivos para los datos de la variable de pronóstico de meses de retraso en los últimos 10 periodos de ejecución del proyecto Santiago previo a la conclusión. Se presentan los datos resultantes para las metodologías EVM y CTCR.

Tabla 4-84: Meses de retraso estimados con EVM en los últimos meses previo a la conclusión del proyecto Santiago

Estadístico	Meses de retraso (EVM) en últimos meses previo a conclusión									
	Mes 10	Mes 9	Mes 8	Mes 7	Mes 6	Mes 5	Mes 4	Mes 3	Mes 2	Mes 1
Mínimo	-11.3	-11.5	-11.6	-11.9	-12.9	-13.8	-14.6	-15.4	-16.3	-16.6
Máximo	3.6	3.6	3.5	3.5	3.7	4.1	3.7	3.8	3.9	4.0
Media	-2.5	-2.5	-2.5	-2.5	-2.6	-2.8	-3.0	-3.3	-3.8	-4.2
Desv. est	2.1	2.1	2.1	2.2	2.3	2.5	2.6	2.8	2.9	3.0
Varianza	4.5	4.5	4.6	4.9	5.4	6.1	6.9	7.8	8.5	8.7
Asimetría	-0.3	-0.3	-0.3	-0.4	-0.4	-0.4	-0.5	-0.5	-0.5	-0.4
Curtosis	2.9	3.0	3.0	3.1	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.1
Moda	-3.6	-3.3	-3.2	-2.6	-1.0	-2.9	-3.7	-4.5	-5.3	-4.6

Tabla 4-85: Meses de retraso estimados con CTCR en los últimos meses previo a la conclusión del proyecto Santiago

Estadístico	Meses de retraso (CTCR) en últimos meses previo a conclusión									
	Mes 10	Mes 9	Mes 8	Mes 7	Mes 6	Mes 5	Mes 4	Mes 3	Mes 2	Mes 1
Mínimo	-12.0	-11.9	-12.3	-12.8	-13.3	-14.1	-14.8	-15.5	-16.0	-16.5
Máximo	3.0	3.1	3.3	3.4	3.5	3.7	3.8	3.8	3.9	4.0
Media	-3.4	-3.3	-3.3	-3.2	-3.2	-3.3	-3.4	-3.6	-3.9	-4.2
Desv. est	2.4	2.4	2.4	2.4	2.5	2.6	2.7	2.8	2.9	2.9
Varianza	5.6	5.7	5.8	6.0	6.2	6.6	7.1	7.7	8.2	8.6
Asimetría	-0.2	-0.2	-0.2	-0.3	-0.3	-0.3	-0.4	-0.4	-0.4	-0.4
Curtosis	2.8	2.8	2.9	2.9	3.0	3.1	3.1	3.1	3.1	3.1
Moda	-3.6	-1.2	-3.0	-2.8	-1.3	-5.3	-3.9	-4.4	-5.0	-5.5

b. Prueba de varianzas iguales Santiago

Previo a proceder con el análisis ANOVA es necesario ejecutar una prueba de varianzas iguales que permita verificar justamente si existe o no igualdad entre varianzas de las variables del análisis. Según los resultados de esta prueba, se puede configurar los requerimientos de un análisis ANOVA y del software para su corrida.

Los datos cumplen los requerimientos estadísticos para realizar la prueba de varianzas iguales, estos son:

- Las variables de respuesta, es decir el pronóstico de plazos, es una variable continua.
- El tamaño de la muestra es mayor a 20. Se tienen 10,000 datos por cada variable
- Cada observación es independiente de todas las demás observaciones, debido a la aleatoriedad que maneja un modelo estocástico con simulación Monte Carlo.

El nivel simultáneo de confianza de Bonferroni utilizado es del 95%.

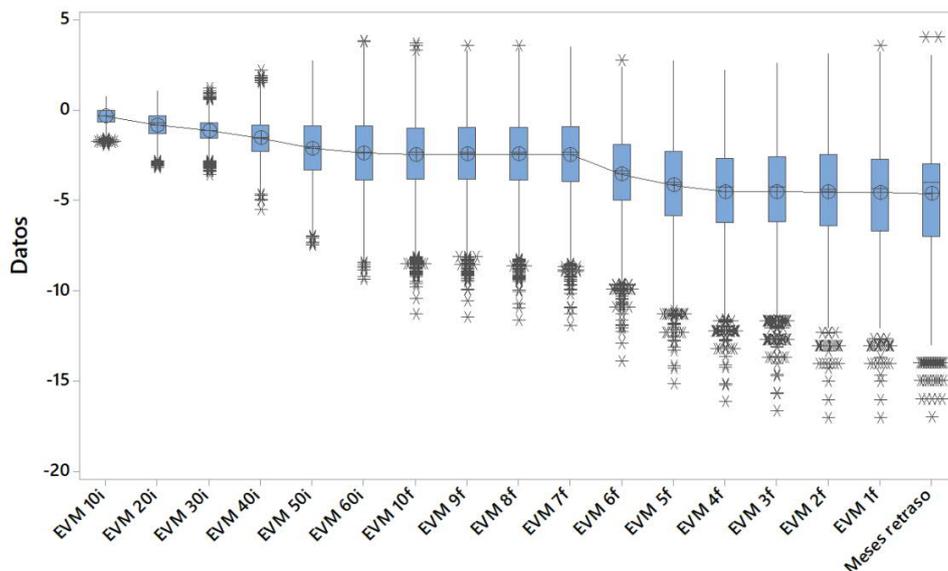
Al tratarse de datos no normales, las pruebas utilizadas son la comparación múltiple y la prueba de Levene.

Para los datos obtenidos con el método EVM, se presentaron los siguientes resultados:

En la Figura 4-78 se presenta un diagrama de caja para las variables analizadas, donde se presenta:

- “Meses retraso” que es la variable de los meses totales de retraso a la conclusión del proyecto.
- “EVM 10i, 20i...60i” son las variables de pronóstico de plazo en los periodos de inicio del proyecto transcurridos: 10 meses, 20 meses, hasta los 60 meses.
- “EVM 10f...1f” son las variables de pronóstico de plazo en los periodos de fin del proyecto en los meses: 10 meses, 9 meses, hasta 1 mes antes de concluida la ejecución del proyecto.

Figura 4-78: Gráfica de caja de las variables para EVM del proyecto Santiago



Prueba de igualdad de varianzas. Las hipótesis para una prueba de varianzas iguales son las siguientes:

- Hipótesis nula ( $H_0$ ).- La hipótesis nula indica que las varianzas son todas iguales.
- Hipótesis alternativa ( $H_A$ ).- La hipótesis alternativa indica que por lo menos una de las varianzas es diferente.
- Nivel de significancia  $\alpha = 0,05$

En la Tabla 4-86 se presentan los intervalos de confianza para las desviaciones estándar calculadas con el software Minitab® V18.

Tabla 4-86: Intervalos de confianza de Bonferroni de 95% para desviaciones estándar para EVM.  
Proyecto Santiago

Muestra	N	Desv.Est.	IC
EVM 10i	10000	0,41899	(0,41046; 0,42783)
EVM 20i	10000	0,67332	(0,66009; 0,68701)
EVM 30i	10000	0,62067	(0,60762; 0,63419)
EVM 40i	10000	1,05823	(1,03776; 1,07942)
EVM 50i	10000	1,69922	(1,66860; 1,73093)
EVM 60i	10000	2,15502	(2,11501; 2,19644)
EVM 10f	10000	2,10980	(2,06687; 2,15427)
EVM 9f	10000	2,11450	(2,07117; 2,15938)
EVM 8f	10000	2,14153	(2,09727; 2,18738)
EVM 7f	10000	2,21042	(2,16392; 2,25859)
EVM 6f	10000	2,32645	(2,27627; 2,37843)
EVM 5f	10000	2,47693	(2,42284; 2,53297)
EVM 4f	10000	2,63328	(2,57571; 2,69293)
EVM 3f	10000	2,78730	(2,72670; 2,85009)
EVM 2f	10000	2,91889	(2,85609; 2,98397)
EVM 1f	10000	2,95410	(2,89139; 3,01907)
Meses retraso	10000	2,95820	(2,89599; 3,02264)

Nivel de confianza individual = 99,7059%

En la Tabla 4-87 se presentan los resultados de la aplicación de las pruebas de comparaciones múltiples y Levene, donde se indican los resultados de “Valor p” para la toma de decisiones en las pruebas de hipótesis planteadas.

Tabla 4-87: Resultados de las pruebas EVM. Proyecto Santiago

Método	Estadística de prueba	Valor p
Comparaciones múltiples	—	0,000
Levene	2503,50	0,000

Como resultado final de la prueba de igualdad de varianzas para EVM, tenemos que el “Valor p” para los métodos de comparaciones múltiples y Levene presentan valores menores a 0.05, por tanto, se rechaza la hipótesis nula concluyendo que no existe igualdad de varianzas de las variables analizadas.

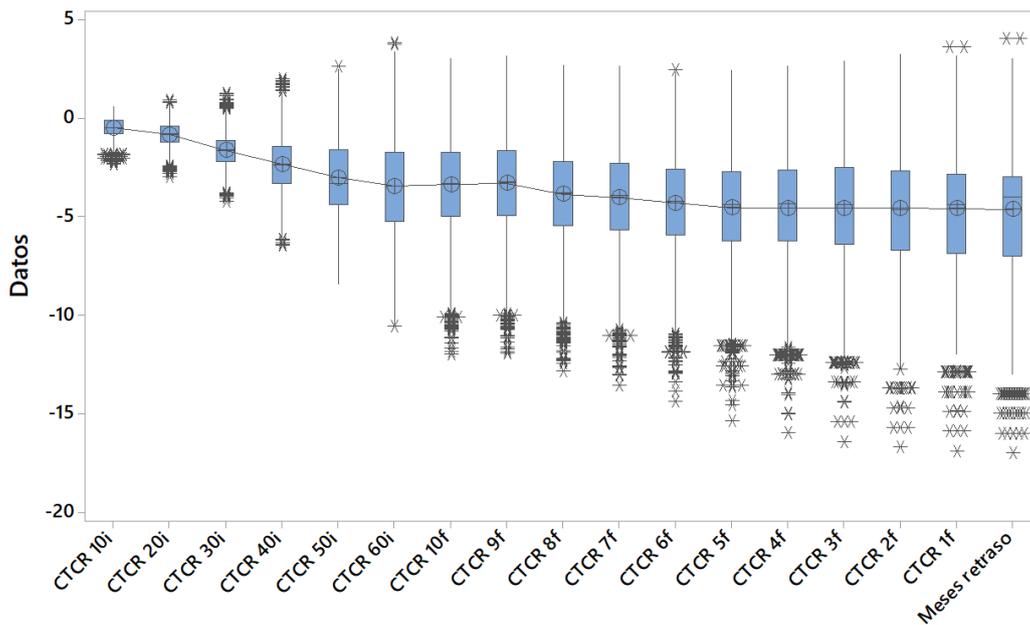
Para los datos obtenidos con el método CTCR, se presentaron los siguientes resultados:

En la Figura 4-79 se presenta un diagrama de caja para las variables analizadas, donde se presenta:

- “Meses retraso” que es la variable de los meses totales de retraso a la conclusión del proyecto.
- “CTCR 10i, 20i...60i” son las variables de pronóstico de plazo en los periodos de inicio del proyecto transcurridos: 10 meses, 20 meses, hasta 60 meses.

- “CTCR 10f...1f” son las variables de pronóstico de plazo en los periodos de fin del proyecto en los meses: 10 meses, 9 meses... hasta 1 mes antes de concluida la ejecución del proyecto.

Figura 4-79: Gráfica de caja de las variables para CTCR para el proyecto Santiago



Prueba de igualdad de varianzas. Las hipótesis para una prueba de varianzas iguales son las siguientes:

- Hipótesis nula ( $H_0$ ).- La hipótesis nula indica que las varianzas son todas iguales.
- Hipótesis alternativa ( $H_A$ ).- La hipótesis alternativa indica que por lo menos una de las varianzas es diferente.
- Nivel de significancia  $\alpha = 0,05$

En la Tabla 4-88 se presentan los intervalos de confianza para las desviaciones estándar calculadas con el software Minitab.

Tabla 4-88: Intervalos de confianza de Bonferroni de 95% para desviaciones estándar para CTCR. Proyecto Santiago

Muestra	N	Desv.Est.	IC
CTCR 10i	10000	0,46054	(0,45088; 0,47053)
CTCR 20i	10000	0,57416	(0,56280; 0,58593)
CTCR 30i	10000	0,76727	(0,75201; 0,78307)
CTCR 40i	10000	1,33433	(1,30912; 1,36042)
CTCR 50i	10000	1,83527	(1,80324; 1,86844)
CTCR 60i	10000	2,40810	(2,36465; 2,45307)
CTCR 10f	10000	2,37139	(2,32494; 2,41950)
CTCR 9f	10000	2,38545	(2,33824; 2,43434)
CTCR 8f	10000	2,40789	(2,35956; 2,45794)
CTCR 7f	10000	2,44278	(2,39297; 2,49437)
CTCR 6f	10000	2,49389	(2,44215; 2,54748)
CTCR 5f	10000	2,56314	(2,50915; 2,61907)
CTCR 4f	10000	2,65855	(2,60217; 2,71696)
CTCR 3f	10000	2,76755	(2,70875; 2,82847)
CTCR 2f	10000	2,86502	(2,80430; 2,92791)
CTCR 1f	10000	2,92988	(2,86817; 2,99381)
Meses retraso	10000	2,95820	(2,89599; 3,02264)

Nivel de confianza individual = 99,7059%

En la Tabla 4-89 se presentan los resultados de la aplicación de las pruebas de comparaciones múltiples y Levene, donde se indican los resultados de “Valor p” para la toma de decisiones en las pruebas de hipótesis planteadas.

Tabla 4-89: Resultados de las pruebas CTCR. Proyecto Santiago

Método	Estadística de prueba	Valor p
Comparaciones múltiples	—	0,000
Levene	2320,13	0,000

Como resultado final de la prueba de igualdad de varianzas para CTCR, tenemos que el “Valor p” para los métodos de comparaciones múltiples y Levene presentan valores menores a 0.05, por tanto, se rechaza la hipótesis nula concluyendo que no existe igualdad de varianzas de las variables analizadas.

c. Análisis ANOVA Santiago

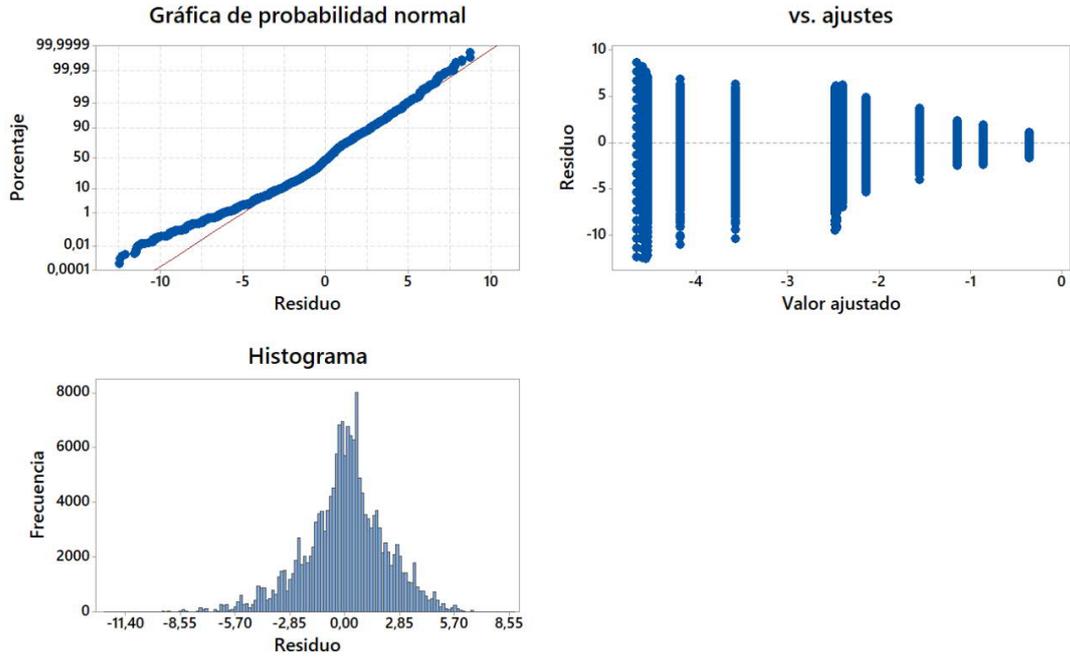
Para este estudio se realizó un análisis ANOVA de un factor. El plazo pronosticado en diferentes periodos de ejecución del proyecto representa el único factor del análisis.

Por otra parte, de acuerdo al análisis de varianzas iguales realizado y presentado en el literal (b) anterior, existe diferencia de varianzas en los grupos de variables analizadas tanto para EVM como para CTCR, y por este motivo se realiza una prueba de Welch de ANOVA. Para el análisis se utilizó el software Minitab® V18.

Para los datos de EVM, el análisis ANOVA determinó los resultados siguientes:

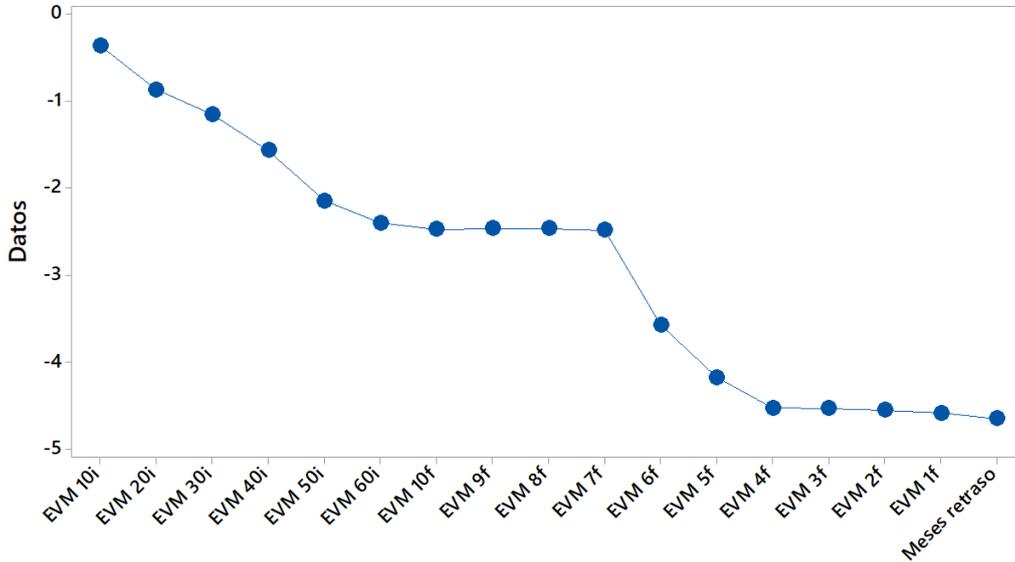
En la Figura 4-80 se presentan las gráficas de residuos obtenidas.

Figura 4-80: Gráficas de residuos para EMV. Proyecto Santiago



En la Figura 4-81 se presentan los intervalos para EVM, con el 95% de Intervalo de Confianza para la media de las variables analizadas.

Figura 4-81: Gráfica de intervalos para EMV- 95% IC para la media. Proyecto Santiago



Las desviaciones estándar individuales se utilizaron para calcular los intervalos.

Las hipótesis para el análisis ANOVA de un solo factor son las siguientes:

- Hipótesis nula ( $H_0$ ).- Todas las medias son iguales.
- Hipótesis alternativa ( $H_A$ ).- No todas las medias son iguales.
- Nivel de significancia  $\alpha = 0,05$
- No se presupuso igualdad de varianzas para el análisis

En la Tabla 4-90 se presenta la información básica para el factor de análisis que representa el plazo pronosticado por el método EVM en los diferentes periodos de tiempo de ejecución del proyecto.

Tabla 4-90: Información del facto para EVM. Proyecto Santiago

Factor	Niveles	Valores
Factor	17	EVM 10i; EVM 20i; EVM 30i; EVM 40i; EVM 50i; EVM 60i; EVM 10f; EVM 9f; EVM 8f; EVM 7f; EVM 6f; EVM 5f; EVM 4f; EVM 3f; EVM 2f; EVM 1f; Meses retraso

En la Tabla 4-91 se presenta los resultados de la prueba de Welch, donde se tiene el “Valor p” para la toma de decisión de la prueba de hipótesis.

Tabla 4-91: Resultados de la prueba de Welch para EVM. Proyecto Santiago

Fuente	GL Num	GL Den	Valor F	Valor p
Factor	16	62992,3	9938,61	0,000

Resultados del análisis de las medias del plazo pronosticado en cada periodo de análisis. El factor es el plazo pronosticado y el IC es el intervalo de confianza de las medias del grupo. Estos intervalos de confianza son rangos de valores que probablemente contienen la media real de cada población. El porcentaje de estos intervalos de confianza que contienen el parámetro es el nivel de confianza del intervalo. En la Tabla 4-92 se presentan estos resultados.

Tabla 4-92: Resultados del análisis de medias y su IC para EVM. Proyecto Santiago

Factor	N	Media	Desv.Est.	IC de 95%
EVM 10i	10000	-0,35829	0,41899	(-0,36650; -0,35007)
EVM 20i	10000	-0,86671	0,67332	(-0,87991; -0,85351)
EVM 30i	10000	-1,15045	0,62067	(-1,16262; -1,13829)
EVM 40i	10000	-1,5644	1,0582	(-1,5852; -1,5437)
EVM 50i	10000	-2,1458	1,6992	(-2,1791; -2,1125)
EVM 60i	10000	-2,3982	2,1550	(-2,4405; -2,3560)
EVM 10f	10000	-2,4754	2,1098	(-2,5167; -2,4340)
EVM 9f	10000	-2,4629	2,1145	(-2,5043; -2,4215)
EVM 8f	10000	-2,4620	2,1415	(-2,5040; -2,4200)
EVM 7f	10000	-2,4848	2,2104	(-2,5281; -2,4415)
EVM 6f	10000	-3,5698	2,3264	(-3,6154; -3,5242)
EVM 5f	10000	-4,1755	2,4769	(-4,2240; -4,1269)
EVM 4f	10000	-4,5307	2,6333	(-4,5823; -4,4791)
EVM 3f	10000	-4,5316	2,7873	(-4,5862; -4,4769)
EVM 2f	10000	-4,5517	2,9189	(-4,6089; -4,4945)
EVM 1f	10000	-4,5850	2,9541	(-4,6429; -4,5271)
Meses retraso	10000	-4,6508	2,9582	(-4,7088; -4,5928)

Comparaciones en parejas de Games-Howell. Como se presupuso que las varianzas no son iguales, el análisis ANOVA realizó una prueba Games-Howell que permite comparar todos los pares del grupo, con control del nivel de confianza simultáneo. En la Tabla 4-93 se presentan los resultados.

Tabla 4-93: Agrupación de datos utilizando el método de Games-Howell y una confianza de 95% para EVM. Proyecto Santiago

Factor	N	Media	Agrupación
EVM 10i	10000	-0,35829	A
EVM 20i	10000	-0,86671	B
EVM 30i	10000	-1,15045	C
EVM 40i	10000	-1,5644	D
EVM 50i	10000	-2,1458	E
EVM 60i	10000	-2,3982	F
EVM 8f	10000	-2,4620	F
EVM 9f	10000	-2,4629	F
EVM 10f	10000	-2,4754	F
EVM 7f	10000	-2,4848	F
EVM 6f	10000	-3,5698	G
EVM 5f	10000	-4,1755	H
EVM 4f	10000	-4,5307	I
EVM 3f	10000	-4,5316	I
EVM 2f	10000	-4,5517	I
EVM 1f	10000	-4,5850	I
Meses retraso	10000	-4,6508	I

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Los resultados presentados en la Tabla 4-93 indican que el grupo "I" demuestran medias iguales, esto corresponde a los niveles de factor: EVM4f hasta la conclusión del proyecto, por tanto, indica que el método EVM demuestra una adecuada precisión y eficiencia desde los 4 meses previos a concluir el proyecto en adelante.

Lo dicho se puede también comprobar en las pruebas simultáneas de Games-Howell presentadas en la Tabla 4-94, donde el "Valor p" demuestra un valor superior al nivel de significancia de 0.05, y por tanto indicando una igualdad de medias para los niveles de factor de 4 meses previos a la conclusión.

Tabla 4-94: Pruebas simultáneas de Games-Howell para diferencias de las medias para EVM. Proyecto Santiago

Diferencia de niveles	Diferencia de las medias	EE de diferencia	IC de 95%	Valor T	Valor p ajustado
EVM 20i - EVM 10i	-0,50842	0,00793	(-0,53585; -0,48100)	-64,11	0,000
EVM 30i - EVM 10i	-0,79217	0,00749	(-0,81806; -0,76627)	-105,78	0,000
EVM 40i - EVM 10i	-1,2061	0,0114	(-1,2455; -1,1668)	-105,97	0,000
EVM 50i - EVM 10i	-1,7875	0,0175	(-1,8480; -1,7270)	-102,14	0,000
EVM 60i - EVM 10i	-2,0399	0,0220	(-2,1159; -1,9640)	-92,92	0,000
EVM 10f - EVM 10i	-2,1171	0,0215	(-2,1915; -2,0427)	-98,42	0,000
EVM 9f - EVM 10i	-2,1046	0,0216	(-2,1791; -2,0301)	-97,63	0,000
EVM 8f - EVM 10i	-2,1037	0,0218	(-2,1792; -2,0283)	-96,41	0,000
EVM 7f - EVM 10i	-2,1265	0,0225	(-2,2043; -2,0487)	-94,52	0,000
EVM 6f - EVM 10i	-3,2115	0,0236	(-3,2932; -3,1298)	-135,86	0,000
EVM 5f - EVM 10i	-3,8172	0,0251	(-3,9040; -3,7303)	-151,95	0,000
EVM 4f - EVM 10i	-4,1724	0,0267	(-4,2646; -4,0802)	-156,48	0,000
EVM 3f - EVM 10i	-4,1733	0,0282	(-4,2707; -4,0758)	-148,06	0,000
EVM 2f - EVM 10i	-4,1934	0,0295	(-4,2954; -4,0914)	-142,21	0,000
EVM 1f - EVM 10i	-4,2267	0,0298	(-4,3299; -4,1235)	-141,66	0,000
Meses retras - EVM 10i	-4,2925	0,0299	(-4,3958; -4,1892)	-143,67	0,000
EVM 30i - EVM 20i	-0,28374	0,00916	(-0,31541; -0,25208)	-30,98	0,000
EVM 40i - EVM 20i	-0,6977	0,0125	(-0,7411; -0,6543)	-55,63	0,000
EVM 50i - EVM 20i	-1,2791	0,0183	(-1,3423; -1,2159)	-69,98	0,000
EVM 60i - EVM 20i	-1,5315	0,0226	(-1,6096; -1,4534)	-67,83	0,000
EVM 10f - EVM 20i	-1,6087	0,0221	(-1,6852; -1,5321)	-72,64	0,000
EVM 9f - EVM 20i	-1,5962	0,0222	(-1,6729; -1,5195)	-71,93	0,000
EVM 8f - EVM 20i	-1,5953	0,0224	(-1,6729; -1,5177)	-71,06	0,000
EVM 7f - EVM 20i	-1,6181	0,0231	(-1,6980; -1,5382)	-70,03	0,000

Aplicación en el sector hidroenergético

EVM 6f - EVM 20i	-2,7031	0,0242	(-2,7868; -2,6193)	-111,61	0,000
EVM 5f - EVM 20i	-3,3087	0,0257	(-3,3975; -3,2200)	-128,90	0,000
EVM 4f - EVM 20i	-3,6640	0,0272	(-3,7580; -3,5700)	-134,80	0,000
EVM 3f - EVM 20i	-3,6648	0,0287	(-3,7640; -3,5657)	-127,81	0,000
EVM 2f - EVM 20i	-3,6850	0,0300	(-3,7886; -3,5814)	-123,02	0,000
EVM 1f - EVM 20i	-3,7183	0,0303	(-3,8230; -3,6135)	-122,72	0,000
Meses retras - EVM 20i	-3,7841	0,0303	(-3,8890; -3,6792)	-124,73	0,000
EVM 40i - EVM 30i	-0,4140	0,0123	(-0,4564; -0,3715)	-33,74	0,000
EVM 50i - EVM 30i	-0,9953	0,0181	(-1,0579; -0,9328)	-55,02	0,000
EVM 60i - EVM 30i	-1,2478	0,0224	(-1,3253; -1,1702)	-55,64	0,000
EVM 10f - EVM 30i	-1,3249	0,0220	(-1,4010; -1,2489)	-60,25	0,000
EVM 9f - EVM 30i	-1,3124	0,0220	(-1,3886; -1,2362)	-59,56	0,000
EVM 8f - EVM 30i	-1,3115	0,0223	(-1,3886; -1,2345)	-58,82	0,000
EVM 7f - EVM 30i	-1,3344	0,0230	(-1,4137; -1,2550)	-58,12	0,000
EVM 6f - EVM 30i	-2,4193	0,0241	(-2,5026; -2,3361)	-100,48	0,000
EVM 5f - EVM 30i	-3,0250	0,0255	(-3,1133; -2,9367)	-118,46	0,000
EVM 4f - EVM 30i	-3,3803	0,0271	(-3,4738; -3,2867)	-124,94	0,000
EVM 3f - EVM 30i	-3,3811	0,0286	(-3,4798; -3,2824)	-118,40	0,000
EVM 2f - EVM 30i	-3,4012	0,0298	(-3,5044; -3,2981)	-113,98	0,000
EVM 1f - EVM 30i	-3,4345	0,0302	(-3,5389; -3,3301)	-113,78	0,000
Meses retras - EVM 30i	-3,5003	0,0302	(-3,6049; -3,3958)	-115,81	0,000
EVM 50i - EVM 40i	-0,5814	0,0200	(-0,6506; -0,5122)	-29,04	0,000
EVM 60i - EVM 40i	-0,8338	0,0240	(-0,9168; -0,7508)	-34,73	0,000
EVM 10f - EVM 40i	-0,9110	0,0236	(-0,9926; -0,8294)	-38,60	0,000
EVM 9f - EVM 40i	-0,8985	0,0236	(-0,9802; -0,8167)	-38,00	0,000
EVM 8f - EVM 40i	-0,8976	0,0239	(-0,9802; -0,8150)	-37,58	0,000
EVM 7f - EVM 40i	-0,9204	0,0245	(-1,0051; -0,8357)	-37,56	0,000
EVM 6f - EVM 40i	-2,0054	0,0256	(-2,0937; -1,9170)	-78,46	0,000
EVM 5f - EVM 40i	-2,6110	0,0269	(-2,7042; -2,5179)	-96,94	0,000
EVM 4f - EVM 40i	-2,9663	0,0284	(-3,0644; -2,8682)	-104,52	0,000
EVM 3f - EVM 40i	-2,9671	0,0298	(-3,0702; -2,8641)	-99,52	0,000
EVM 2f - EVM 40i	-2,9873	0,0310	(-3,0946; -2,8799)	-96,21	0,000
EVM 1f - EVM 40i	-3,0206	0,0314	(-3,1291; -2,9121)	-96,26	0,000
Meses retras - EVM 40i	-3,0864	0,0314	(-3,1950; -2,9778)	-98,24	0,000

Aplicación en el sector hidroenergético

EVM 60i - EVM 50i	-0,2524	0,0274	(-0,3473; -0,1575)	-9,20	0,000
EVM 10f - EVM 50i	-0,3296	0,0271	(-0,4233; -0,2359)	-12,17	0,000
EVM 9f - EVM 50i	-0,3171	0,0271	(-0,4109; -0,2233)	-11,69	0,000
EVM 8f - EVM 50i	-0,3162	0,0273	(-0,4107; -0,2217)	-11,57	0,000
EVM 7f - EVM 50i	-0,3390	0,0279	(-0,4354; -0,2426)	-12,16	0,000
EVM 6f - EVM 50i	-1,4240	0,0288	(-1,5236; -1,3244)	-49,43	0,000
EVM 5f - EVM 50i	-2,0297	0,0300	(-2,1335; -1,9258)	-67,57	0,000
EVM 4f - EVM 50i	-2,3849	0,0313	(-2,4933; -2,2765)	-76,10	0,000
EVM 3f - EVM 50i	-2,3858	0,0326	(-2,4986; -2,2729)	-73,08	0,000
EVM 2f - EVM 50i	-2,4059	0,0338	(-2,5227; -2,2891)	-71,23	0,000
EVM 1f - EVM 50i	-2,4392	0,0341	(-2,5570; -2,3213)	-71,57	0,000
Meses retras - EVM 50i	-2,5050	0,0341	(-2,6230; -2,3870)	-73,43	0,000
EVM 10f - EVM 60i	-0,0772	0,0302	(-0,1814; 0,0271)	-2,56	0,457
EVM 9f - EVM 60i	-0,0647	0,0302	(-0,1691; 0,0397)	-2,14	0,766
EVM 8f - EVM 60i	-0,0638	0,0304	(-0,1688; 0,0413)	-2,10	0,793
EVM 7f - EVM 60i	-0,0866	0,0309	(-0,1933; 0,0202)	-2,80	0,288
EVM 6f - EVM 60i	-1,1716	0,0317	(-1,2812; -1,0619)	-36,94	0,000
EVM 5f - EVM 60i	-1,7772	0,0328	(-1,8908; -1,6637)	-54,13	0,000
EVM 4f - EVM 60i	-2,1325	0,0340	(-2,2501; -2,0148)	-62,67	0,000
EVM 3f - EVM 60i	-2,1333	0,0352	(-2,2552; -2,0115)	-60,55	0,000
EVM 2f - EVM 60i	-2,1535	0,0363	(-2,2789; -2,0280)	-59,35	0,000
EVM 1f - EVM 60i	-2,1867	0,0366	(-2,3132; -2,0603)	-59,80	0,000
Meses retras - EVM 60i	-2,2526	0,0366	(-2,3791; -2,1260)	-61,55	0,000
EVM 9f - EVM 10f	0,0125	0,0299	(-0,0908; 0,1158)	0,42	1,000
EVM 8f - EVM 10f	0,0134	0,0301	(-0,0906; 0,1173)	0,45	1,000
EVM 7f - EVM 10f	-0,0094	0,0306	(-0,1151; 0,0962)	-0,31	1,000
EVM 6f - EVM 10f	-1,0944	0,0314	(-1,2030; -0,9858)	-34,85	0,000
EVM 5f - EVM 10f	-1,7001	0,0325	(-1,8126; -1,5876)	-52,25	0,000
EVM 4f - EVM 10f	-2,0553	0,0337	(-2,1720; -1,9387)	-60,91	0,000
EVM 3f - EVM 10f	-2,0562	0,0350	(-2,1771; -1,9353)	-58,82	0,000
EVM 2f - EVM 10f	-2,0763	0,0360	(-2,2008; -1,9518)	-57,65	0,000
EVM 1f - EVM 10f	-2,1096	0,0363	(-2,2351; -1,9841)	-58,11	0,000
Meses retras - EVM 10f	-2,1754	0,0363	(-2,3011; -2,0498)	-59,87	0,000
EVM 8f - EVM 9f	0,0009	0,0301	(-0,1032; 0,1050)	0,03	1,000

Aplicación en el sector hidroenergético

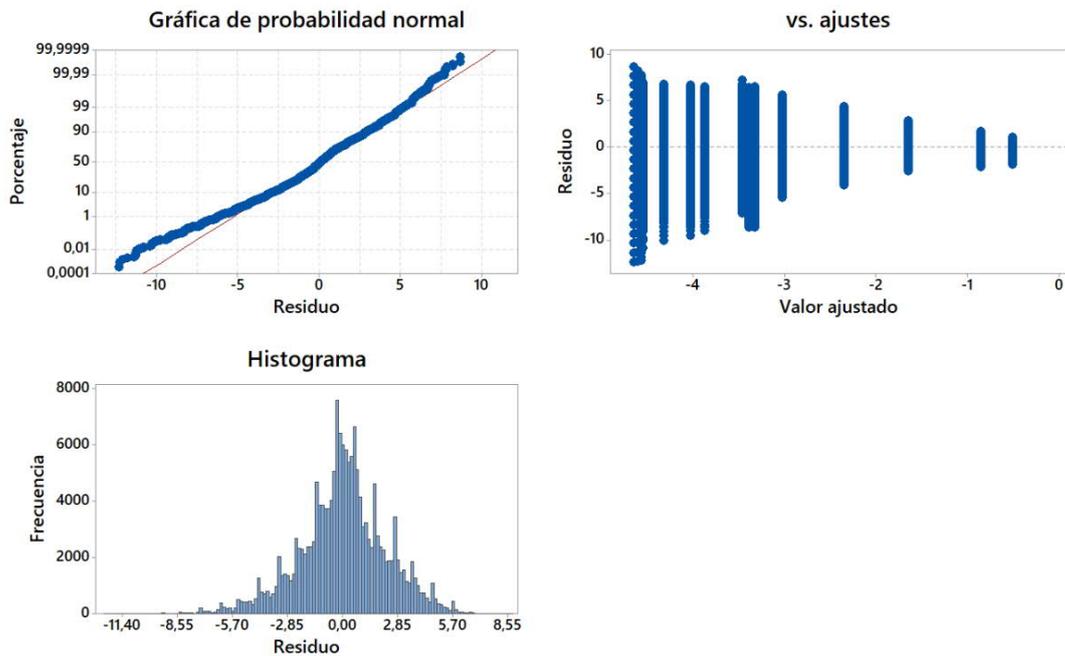
EVM 7f - EVM 9f	-0,0219	0,0306	(-0,1277; 0,0839)	-0,72	1,000
EVM 6f - EVM 9f	-1,1069	0,0314	(-1,2156; -0,9982)	-35,21	0,000
EVM 5f - EVM 9f	-1,7126	0,0326	(-1,8252; -1,5999)	-52,59	0,000
EVM 4f - EVM 9f	-2,0678	0,0338	(-2,1846; -1,9510)	-61,23	0,000
EVM 3f - EVM 9f	-2,0687	0,0350	(-2,1896; -1,9477)	-59,13	0,000
EVM 2f - EVM 9f	-2,0888	0,0360	(-2,2134; -1,9642)	-57,95	0,000
EVM 1f - EVM 9f	-2,1221	0,0363	(-2,2477; -1,9965)	-58,41	0,000
Meses retras - EVM 9f	-2,1879	0,0364	(-2,3136; -2,0622)	-60,17	0,000
EVM 7f - EVM 8f	-0,0228	0,0308	(-0,1292; 0,0836)	-0,74	1,000
EVM 6f - EVM 8f	-1,1078	0,0316	(-1,2171; -0,9984)	-35,03	0,000
EVM 5f - EVM 8f	-1,7135	0,0327	(-1,8267; -1,6002)	-52,33	0,000
EVM 4f - EVM 8f	-2,0687	0,0339	(-2,1861; -1,9513)	-60,95	0,000
EVM 3f - EVM 8f	-2,0696	0,0351	(-2,1911; -1,9480)	-58,88	0,000
EVM 2f - EVM 8f	-2,0897	0,0362	(-2,2149; -1,9645)	-57,72	0,000
EVM 1f - EVM 8f	-2,1230	0,0365	(-2,2491; -1,9968)	-58,18	0,000
Meses retras - EVM 8f	-2,1888	0,0365	(-2,3151; -2,0625)	-59,93	0,000
EVM 6f - EVM 7f	-1,0850	0,0321	(-1,1959; -0,9740)	-33,81	0,000
EVM 5f - EVM 7f	-1,6907	0,0332	(-1,8054; -1,5759)	-50,93	0,000
EVM 4f - EVM 7f	-2,0459	0,0344	(-2,1648; -1,9270)	-59,51	0,000
EVM 3f - EVM 7f	-2,0468	0,0356	(-2,1698; -1,9237)	-57,54	0,000
EVM 2f - EVM 7f	-2,0669	0,0366	(-2,1935; -1,9403)	-56,45	0,000
EVM 1f - EVM 7f	-2,1002	0,0369	(-2,2277; -1,9726)	-56,92	0,000
Meses retras - EVM 7f	-2,1660	0,0369	(-2,2937; -2,0383)	-58,65	0,000
EVM 5f - EVM 6f	-0,6057	0,0340	(-0,7232; -0,4882)	-17,82	0,000
EVM 4f - EVM 6f	-0,9609	0,0351	(-1,0824; -0,8394)	-27,35	0,000
EVM 3f - EVM 6f	-0,9618	0,0363	(-1,0873; -0,8362)	-26,49	0,000
EVM 2f - EVM 6f	-0,9819	0,0373	(-1,1110; -0,8528)	-26,31	0,000
EVM 1f - EVM 6f	-1,0152	0,0376	(-1,1452; -0,8852)	-27,00	0,000
Meses retras - EVM 6f	-1,0810	0,0376	(-1,2111; -0,9509)	-28,72	0,000
EVM 4f - EVM 5f	-0,3552	0,0362	(-0,4802; -0,2302)	-9,83	0,000
EVM 3f - EVM 5f	-0,3561	0,0373	(-0,4850; -0,2272)	-9,55	0,000
EVM 2f - EVM 5f	-0,3762	0,0383	(-0,5086; -0,2439)	-9,83	0,000
EVM 1f - EVM 5f	-0,4095	0,0386	(-0,5428; -0,2762)	-10,62	0,000
Meses retras - EVM 5f	-0,4753	0,0386	(-0,6088; -0,3419)	-12,32	0,000

EVM 3f - EVM 4f	-0,0009	0,0383	(-0,1334; 0,1317)	-0,02	1,000
EVM 2f - EVM 4f	-0,0210	0,0393	(-0,1569; 0,1149)	-0,53	1,000
EVM 1f - EVM 4f	-0,0543	0,0396	(-0,1911; 0,0826)	-1,37	0,995
Meses retras - EVM 4f	-0,1201	0,0396	(-0,2570; 0,0168)	-3,03	0,170
EVM 2f - EVM 3f	-0,0201	0,0404	(-0,1597; 0,1194)	-0,50	1,000
EVM 1f - EVM 3f	-0,0534	0,0406	(-0,1938; 0,0870)	-1,32	0,997
Meses retras - EVM 3f	-0,1192	0,0406	(-0,2598; 0,0213)	-2,93	0,216
EVM 1f - EVM 2f	-0,0333	0,0415	(-0,1769; 0,1103)	-0,80	1,000
Meses retras - EVM 2f	-0,0991	0,0416	(-0,2428; 0,0446)	-2,38	0,590
Meses retras - EVM 1f	-0,0658	0,0418	(-0,2104; 0,0787)	-1,57	0,980

Para los datos de CTCR, el análisis ANOVA determinó los resultados siguientes:

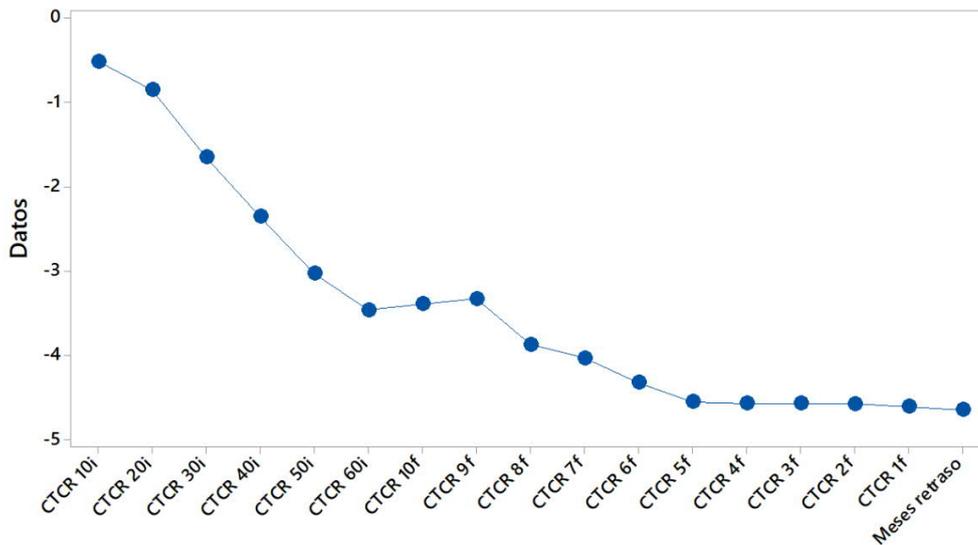
En la Figura 4-82 se presentan las gráficas de residuos obtenidas.

Figura 4-82: Gráficas de residuos para CTCR. Proyecto Santiago



En la Figura 4-83 se presentan los intervalos para CTCR, con el 95% de Intervalo de Confianza para la media de las variables analizadas.

Figura 4-83: Gráfica de intervalos para CTCR Santiago- 95% IC para la media. Proyecto Santiago



*Las desviaciones estándar individuales se utilizaron para calcular los intervalos.*

Las hipótesis para el análisis ANOVA de un solo factor son las siguientes:

- Hipótesis nula ( $H_0$ ).- Todas las medias son iguales.
- Hipótesis alternativa ( $H_A$ ).- No todas las medias son iguales.
- Nivel de significancia  $\alpha = 0,05$
- No se presupuso igualdad de varianzas para el análisis

En la Tabla 4-95 se presenta la información básica para el factor de análisis que representa el plazo pronosticado por el método CTCR en los diferentes periodos de tiempo de ejecución del proyecto.

Tabla 4-95: Información del facto para CTCR. Proyecto Santiago

Factor	Niveles	Valores
Factor	17	CTCR 10i; CTCR 20i; CTCR 30i; CTCR 40i; CTCR 50i; CTCR 60i; CTCR 10f; CTCR 9f; CTCR 8f; CTCR 7f; CTCR 6f; CTCR 5f; CTCR 4f; CTCR 3f; CTCR 2f; CTCR 1f; Meses retraso

En la Tabla 4-96 se presenta los resultados de la prueba de Welch, donde se tiene el "Valor p" para la toma de decisión de la prueba de hipótesis.

Tabla 4-96: Resultados de la prueba de Welch CTCR. Proyecto Santiago

Fuente	GL Num	GL Den	Valor F	Valor p
Factor	16	62991,3	12225,33	0,000

Resultados del análisis de las medias del plazo pronosticado en cada periodo de análisis.- El factor es el plazo pronosticado y el IC es el intervalo de confianza de las medias del grupo. Estos intervalos de confianza son rangos de valores que probablemente contienen la media real de cada población. El porcentaje de estos intervalos de confianza que contienen el parámetro es el nivel de confianza del intervalo. En la Tabla 4-97 se presentan estos resultados.

Tabla 4-97: Resultados del análisis de medias y su IC para CTCR. Proyecto Santiago

Factor	N	Media	Desv.Est.	IC de 95%
CTCR 10i	10000	-0,51492	0,46054	(-0,52394; -0,50589)
CTCR 20i	10000	-0,85329	0,57416	(-0,86454; -0,84203)
CTCR 30i	10000	-1,64886	0,76727	(-1,66390; -1,63382)
CTCR 40i	10000	-2,3562	1,3343	(-2,3823; -2,3300)
CTCR 50i	10000	-3,0312	1,8353	(-3,0672; -2,9952)
CTCR 60i	10000	-3,4645	2,4081	(-3,5117; -3,4173)
CTCR 10f	10000	-3,3908	2,3714	(-3,4373; -3,3443)
CTCR 9f	10000	-3,3281	2,3855	(-3,3749; -3,2814)
CTCR 8f	10000	-3,8739	2,4079	(-3,9211; -3,8267)
CTCR 7f	10000	-4,0352	2,4428	(-4,0831; -3,9873)
CTCR 6f	10000	-4,3246	2,4939	(-4,3735; -4,2757)
CTCR 5f	10000	-4,5523	2,5631	(-4,6025; -4,5020)

Aplicación en el sector hidroenergético

CTCR 4f	10000	-4,5709	2,6585	(-4,6230; -4,5188)
CTCR 3f	10000	-4,5718	2,7676	(-4,6261; -4,5176)
CTCR 2f	10000	-4,5750	2,8650	(-4,6312; -4,5189)
CTCR 1f	10000	-4,6114	2,9299	(-4,6688; -4,5540)
Meses retraso	10000	-4,6508	2,9582	(-4,7088; -4,5928)

Comparaciones en parejas de Games-Howell. Como se presupuso que las varianzas no son iguales, el análisis ANOVA realizó una prueba Games-Howell que permite comparar todos los pares del grupo, con control del nivel de confianza simultáneo. En la Tabla 4-98 se presentan los resultados.

Tabla 4-98: Agrupación de datos utilizando el método de Games-Howell y una confianza de 95% para CTCR. Proyecto Santiago

Factor	N	Media	Agrupación
CTCR 10i	10000	-0,51492	A
CTCR 20i	10000	-0,85329	B
CTCR 30i	10000	-1,64886	C
CTCR 40i	10000	-2,3562	D
CTCR 50i	10000	-3,0312	E
CTCR 9f	10000	-3,3281	F
CTCR 10f	10000	-3,3908	F G
CTCR 60i	10000	-3,4645	G
CTCR 8f	10000	-3,8739	H
CTCR 7f	10000	-4,0352	I
CTCR 6f	10000	-4,3246	J
CTCR 5f	10000	-4,5523	K
CTCR 4f	10000	-4,5709	K
CTCR 3f	10000	-4,5718	K
CTCR 2f	10000	-4,5750	K
CTCR 1f	10000	-4,6114	K
Meses retraso	10000	-4,6508	K

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Los resultados presentados en la Tabla 4-98 indican que el grupo "K" demuestran medias iguales, esto corresponde a los niveles de factor: CTCR5f hasta la conclusión del proyecto, por tanto, indica que el método CTCR demuestra una adecuada precisión y eficiencia desde los 5 meses previos a concluir el proyecto en adelante.

Lo dicho se puede también comprobar en las pruebas simultáneas de Games-Howell presentadas en la Tabla 4-99, donde el "Valor p" demuestra un valor superior al nivel de significancia de 0.05, y por tanto indicando una igualdad de medias para los niveles de factor de 5 meses previos a la conclusión.

Tabla 4-99: Pruebas simultáneas de Games-Howell para diferencias de las medias para CTCR. Proyecto Santiago

Diferencia de niveles	Diferencia de las medias	EE de diferencia	IC de 95%	Valor T	Valor p ajustado
CTCR 20i - CTCR 10i	-0,33837	0,00736	(-0,36382; -0,31292)	-45,97	0,000
CTCR 30i - CTCR 10i	-1,13395	0,00895	(-1,16489; -1,10300)	-126,72	0,000
CTCR 40i - CTCR 10i	-1,8413	0,0141	(-1,8901; -1,7925)	-130,44	0,000
CTCR 50i - CTCR 10i	-2,5163	0,0189	(-2,5817; -2,4509)	-132,98	0,000
CTCR 60i - CTCR 10i	-2,9496	0,0245	(-3,0343; -2,8648)	-120,31	0,000
CTCR 10f - CTCR 10i	-2,8759	0,0242	(-2,9594; -2,7924)	-119,05	0,000
CTCR 9f - CTCR 10i	-2,8132	0,0243	(-2,8972; -2,7292)	-115,79	0,000
CTCR 8f - CTCR 10i	-3,3590	0,0245	(-3,4438; -3,2742)	-137,02	0,000
CTCR 7f - CTCR 10i	-3,5203	0,0249	(-3,6062; -3,4343)	-141,61	0,000
CTCR 6f - CTCR 10i	-3,8097	0,0254	(-3,8974; -3,7220)	-150,22	0,000
CTCR 5f - CTCR 10i	-4,0374	0,0260	(-4,1274; -3,9473)	-155,03	0,000
CTCR 4f - CTCR 10i	-4,0560	0,0270	(-4,1493; -3,9627)	-150,32	0,000
CTCR 3f - CTCR 10i	-4,0569	0,0281	(-4,1539; -3,9599)	-144,60	0,000
CTCR 2f - CTCR 10i	-4,0601	0,0290	(-4,1604; -3,9598)	-139,92	0,000
CTCR 1f - CTCR 10i	-4,0965	0,0297	(-4,1990; -3,9939)	-138,12	0,000
Meses retras - CTCR 10i	-4,1359	0,0299	(-4,2394; -4,0324)	-138,15	0,000
CTCR 30i - CTCR 20i	-0,79557	0,00958	(-0,82871; -0,76244)	-83,02	0,000

Aplicación en el sector hidroenergético

CTCR 40i - CTCR 20i	-1,5029	0,0145	(-1,5531; -1,4527)	-103,46	0,000
CTCR 50i - CTCR 20i	-2,1779	0,0192	(-2,2444; -2,1114)	-113,26	0,000
CTCR 60i - CTCR 20i	-2,6112	0,0248	(-2,6968; -2,5256)	-105,48	0,000
CTCR 10f - CTCR 20i	-2,5375	0,0244	(-2,6219; -2,4532)	-104,00	0,000
CTCR 9f - CTCR 20i	-2,4749	0,0245	(-2,5597; -2,3900)	-100,87	0,000
CTCR 8f - CTCR 20i	-3,0206	0,0248	(-3,1062; -2,9350)	-122,03	0,000
CTCR 7f - CTCR 20i	-3,1819	0,0251	(-3,2687; -3,0951)	-126,80	0,000
CTCR 6f - CTCR 20i	-3,4713	0,0256	(-3,5598; -3,3828)	-135,65	0,000
CTCR 5f - CTCR 20i	-3,6990	0,0263	(-3,7898; -3,6082)	-140,82	0,000
CTCR 4f - CTCR 20i	-3,7176	0,0272	(-3,8116; -3,6235)	-136,68	0,000
CTCR 3f - CTCR 20i	-3,7185	0,0283	(-3,8163; -3,6208)	-131,56	0,000
CTCR 2f - CTCR 20i	-3,7217	0,0292	(-3,8228; -3,6207)	-127,37	0,000
CTCR 1f - CTCR 20i	-3,7581	0,0299	(-3,8614; -3,6549)	-125,87	0,000
Meses retras - CTCR 20i	-3,7975	0,0301	(-3,9017; -3,6933)	-126,02	0,000
CTCR 40i - CTCR 30i	-0,7073	0,0154	(-0,7605; -0,6541)	-45,95	0,000
CTCR 50i - CTCR 30i	-1,3824	0,0199	(-1,4511; -1,3136)	-69,49	0,000
CTCR 60i - CTCR 30i	-1,8156	0,0253	(-1,9030; -1,7282)	-71,84	0,000
CTCR 10f - CTCR 30i	-1,7420	0,0249	(-1,8281; -1,6558)	-69,89	0,000
CTCR 9f - CTCR 30i	-1,6793	0,0251	(-1,7659; -1,5926)	-67,02	0,000
CTCR 8f - CTCR 30i	-2,2251	0,0253	(-2,3124; -2,1377)	-88,04	0,000
CTCR 7f - CTCR 30i	-2,3863	0,0256	(-2,4749; -2,2978)	-93,20	0,000
CTCR 6f - CTCR 30i	-2,6758	0,0261	(-2,7660; -2,5855)	-102,55	0,000
CTCR 5f - CTCR 30i	-2,9034	0,0268	(-2,9959; -2,8109)	-108,52	0,000
CTCR 4f - CTCR 30i	-2,9220	0,0277	(-3,0177; -2,8263)	-105,60	0,000
CTCR 3f - CTCR 30i	-2,9229	0,0287	(-3,0222; -2,8236)	-101,78	0,000
CTCR 2f - CTCR 30i	-2,9262	0,0297	(-3,0287; -2,8236)	-98,66	0,000
CTCR 1f - CTCR 30i	-2,9625	0,0303	(-3,0673; -2,8578)	-97,82	0,000
Meses retras - CTCR 30i	-3,0019	0,0306	(-3,1076; -2,8963)	-98,23	0,000
CTCR 50i - CTCR 40i	-0,6750	0,0227	(-0,7535; -0,5966)	-29,75	0,000
CTCR 60i - CTCR 40i	-1,1083	0,0275	(-1,2035; -1,0131)	-40,26	0,000
CTCR 10f - CTCR 40i	-1,0346	0,0272	(-1,1287; -0,9405)	-38,02	0,000
CTCR 9f - CTCR 40i	-0,9720	0,0273	(-1,0665; -0,8774)	-35,56	0,000
CTCR 8f - CTCR 40i	-1,5177	0,0275	(-1,6129; -1,4225)	-55,13	0,000
CTCR 7f - CTCR 40i	-1,6790	0,0278	(-1,7752; -1,5827)	-60,32	0,000

Aplicación en el sector hidroenergético

CTCR 6f - CTCR 40i	-1,9684	0,0283	(-2,0662; -1,8706)	-69,60	0,000
CTCR 5f - CTCR 40i	-2,1961	0,0289	(-2,2960; -2,0962)	-76,00	0,000
CTCR 4f - CTCR 40i	-2,2147	0,0297	(-2,3175; -2,1118)	-74,45	0,000
CTCR 3f - CTCR 40i	-2,2156	0,0307	(-2,3219; -2,1094)	-72,11	0,000
CTCR 2f - CTCR 40i	-2,2188	0,0316	(-2,3281; -2,1095)	-70,20	0,000
CTCR 1f - CTCR 40i	-2,2552	0,0322	(-2,3665; -2,1439)	-70,05	0,000
Meses retras - CTCR 40i	-2,2946	0,0325	(-2,4068; -2,1824)	-70,71	0,000
CTCR 60i - CTCR 50i	-0,4333	0,0303	(-0,5380; -0,3286)	-14,31	0,000
CTCR 10f - CTCR 50i	-0,3596	0,0300	(-0,4633; -0,2559)	-11,99	0,000
CTCR 9f - CTCR 50i	-0,2969	0,0301	(-0,4010; -0,1929)	-9,87	0,000
CTCR 8f - CTCR 50i	-0,8427	0,0303	(-0,9474; -0,7380)	-27,83	0,000
CTCR 7f - CTCR 50i	-1,0040	0,0306	(-1,1096; -0,8983)	-32,86	0,000
CTCR 6f - CTCR 50i	-1,2934	0,0310	(-1,4005; -1,1863)	-41,77	0,000
CTCR 5f - CTCR 50i	-1,5211	0,0315	(-1,6301; -1,4121)	-48,25	0,000
CTCR 4f - CTCR 50i	-1,5397	0,0323	(-1,6514; -1,4280)	-47,66	0,000
CTCR 3f - CTCR 50i	-1,5406	0,0332	(-1,6554; -1,4258)	-46,39	0,000
CTCR 2f - CTCR 50i	-1,5438	0,0340	(-1,6614; -1,4262)	-45,37	0,000
CTCR 1f - CTCR 50i	-1,5802	0,0346	(-1,6997; -1,4606)	-45,71	0,000
Meses retras - CTCR 50i	-1,6196	0,0348	(-1,7400; -1,4992)	-46,52	0,000
CTCR 10f - CTCR 60i	0,0737	0,0338	(-0,0432; 0,1905)	2,18	0,741
CTCR 9f - CTCR 60i	0,1363	0,0339	(0,0191; 0,2535)	4,02	0,007
CTCR 8f - CTCR 60i	-0,4094	0,0341	(-0,5272; -0,2917)	-12,02	0,000
CTCR 7f - CTCR 60i	-0,5707	0,0343	(-0,6893; -0,4521)	-16,64	0,000
CTCR 6f - CTCR 60i	-0,8601	0,0347	(-0,9800; -0,7403)	-24,81	0,000
CTCR 5f - CTCR 60i	-1,0878	0,0352	(-1,2094; -0,9662)	-30,93	0,000
CTCR 4f - CTCR 60i	-1,1064	0,0359	(-1,2304; -0,9824)	-30,84	0,000
CTCR 3f - CTCR 60i	-1,1073	0,0367	(-1,2342; -0,9805)	-30,18	0,000
CTCR 2f - CTCR 60i	-1,1105	0,0374	(-1,2399; -0,9811)	-29,67	0,000
CTCR 1f - CTCR 60i	-1,1469	0,0379	(-1,2781; -1,0158)	-30,24	0,000
Meses retras - CTCR 60i	-1,1863	0,0381	(-1,3182; -1,0544)	-31,10	0,000
CTCR 9f - CTCR 10f	0,0627	0,0336	(-0,0536; 0,1790)	1,86	0,910
CTCR 8f - CTCR 10f	-0,4831	0,0338	(-0,6000; -0,3662)	-14,29	0,000
CTCR 7f - CTCR 10f	-0,6444	0,0340	(-0,7621; -0,5266)	-18,93	0,000
CTCR 6f - CTCR 10f	-0,9338	0,0344	(-1,0528; -0,8148)	-27,13	0,000

Aplicación en el sector hidroenergético

CTCR 5f - CTCR 10f	-1,1615	0,0349	(-1,2822; -1,0407)	-33,26	0,000
CTCR 4f - CTCR 10f	-1,1801	0,0356	(-1,3032; -1,0569)	-33,12	0,000
CTCR 3f - CTCR 10f	-1,1810	0,0364	(-1,3070; -1,0550)	-32,40	0,000
CTCR 2f - CTCR 10f	-1,1842	0,0372	(-1,3128; -1,0556)	-31,84	0,000
CTCR 1f - CTCR 10f	-1,2206	0,0377	(-1,3509; -1,0903)	-32,38	0,000
Meses retras - CTCR 10f	-1,2600	0,0379	(-1,3911; -1,1289)	-33,23	0,000
CTCR 8f - CTCR 9f	-0,5458	0,0339	(-0,6630; -0,4286)	-16,10	0,000
CTCR 7f - CTCR 9f	-0,7070	0,0341	(-0,8251; -0,5890)	-20,71	0,000
CTCR 6f - CTCR 9f	-0,9965	0,0345	(-1,1158; -0,8771)	-28,87	0,000
CTCR 5f - CTCR 9f	-1,2241	0,0350	(-1,3452; -1,1031)	-34,96	0,000
CTCR 4f - CTCR 9f	-1,2427	0,0357	(-1,3662; -1,1192)	-34,79	0,000
CTCR 3f - CTCR 9f	-1,2437	0,0365	(-1,3700; -1,1173)	-34,04	0,000
CTCR 2f - CTCR 9f	-1,2469	0,0373	(-1,3758; -1,1180)	-33,45	0,000
CTCR 1f - CTCR 9f	-1,2833	0,0378	(-1,4139; -1,1526)	-33,97	0,000
Meses retras - CTCR 9f	-1,3227	0,0380	(-1,4541; -1,1913)	-34,81	0,000
CTCR 7f - CTCR 8f	-0,1613	0,0343	(-0,2799; -0,0427)	-4,70	0,000
CTCR 6f - CTCR 8f	-0,4507	0,0347	(-0,5706; -0,3308)	-13,00	0,000
CTCR 5f - CTCR 8f	-0,6784	0,0352	(-0,8000; -0,5568)	-19,29	0,000
CTCR 4f - CTCR 8f	-0,6970	0,0359	(-0,8210; -0,5729)	-19,43	0,000
CTCR 3f - CTCR 8f	-0,6979	0,0367	(-0,8247; -0,5710)	-19,02	0,000
CTCR 2f - CTCR 8f	-0,7011	0,0374	(-0,8305; -0,5717)	-18,73	0,000
CTCR 1f - CTCR 8f	-0,7375	0,0379	(-0,8686; -0,6064)	-19,45	0,000
Meses retras - CTCR 8f	-0,7769	0,0381	(-0,9088; -0,6450)	-20,37	0,000
CTCR 6f - CTCR 7f	-0,2894	0,0349	(-0,4101; -0,1687)	-8,29	0,000
CTCR 5f - CTCR 7f	-0,5171	0,0354	(-0,6395; -0,3947)	-14,60	0,000
CTCR 4f - CTCR 7f	-0,5357	0,0361	(-0,6605; -0,4109)	-14,84	0,000
CTCR 3f - CTCR 7f	-0,5366	0,0369	(-0,6643; -0,4090)	-14,54	0,000
CTCR 2f - CTCR 7f	-0,5398	0,0377	(-0,6700; -0,4096)	-14,34	0,000
CTCR 1f - CTCR 7f	-0,5762	0,0381	(-0,7081; -0,4443)	-15,11	0,000
Meses retras - CTCR 7f	-0,6156	0,0384	(-0,7483; -0,4830)	-16,05	0,000
CTCR 5f - CTCR 6f	-0,2277	0,0358	(-0,3513; -0,1040)	-6,37	0,000
CTCR 4f - CTCR 6f	-0,2463	0,0365	(-0,3723; -0,1202)	-6,76	0,000
CTCR 3f - CTCR 6f	-0,2472	0,0373	(-0,3760; -0,1184)	-6,64	0,000
CTCR 2f - CTCR 6f	-0,2504	0,0380	(-0,3817; -0,1191)	-6,59	0,000

Aplicación en el sector hidroenergético

CTCR 1f - CTCR 6f	-0,2868	0,0385	(-0,4198; -0,1537)	-7,45	0,000
Meses retras - CTCR 6f	-0,3262	0,0387	(-0,4600; -0,1924)	-8,43	0,000
CTCR 4f - CTCR 5f	-0,0186	0,0369	(-0,1463; 0,1091)	-0,50	1,000
CTCR 3f - CTCR 5f	-0,0195	0,0377	(-0,1500; 0,1109)	-0,52	1,000
CTCR 2f - CTCR 5f	-0,0227	0,0384	(-0,1557; 0,1102)	-0,59	1,000
CTCR 1f - CTCR 5f	-0,0591	0,0389	(-0,1937; 0,0755)	-1,52	0,986
Meses retras - CTCR 5f	-0,0985	0,0391	(-0,2339; 0,0368)	-2,52	0,488
CTCR 3f - CTCR 4f	-0,0009	0,0384	(-0,1336; 0,1318)	-0,02	1,000
CTCR 2f - CTCR 4f	-0,0041	0,0391	(-0,1393; 0,1310)	-0,11	1,000
CTCR 1f - CTCR 4f	-0,0405	0,0396	(-0,1773; 0,0963)	-1,02	1,000
Meses retras - CTCR 4f	-0,0799	0,0398	(-0,2174; 0,0576)	-2,01	0,844
CTCR 2f - CTCR 3f	-0,0032	0,0398	(-0,1409; 0,1345)	-0,08	1,000
CTCR 1f - CTCR 3f	-0,0396	0,0403	(-0,1790; 0,0998)	-0,98	1,000
Meses retras - CTCR 3f	-0,0790	0,0405	(-0,2191; 0,0611)	-1,95	0,874
CTCR 1f - CTCR 2f	-0,0364	0,0410	(-0,1781; 0,1053)	-0,89	1,000
Meses retras - CTCR 2f	-0,0758	0,0412	(-0,2182; 0,0666)	-1,84	0,919
Meses retras - CTCR 1f	-0,0394	0,0416	(-0,1834; 0,1046)	-0,95	1,000

## 4.7 Comprobación del método del Cronograma Valorado

Como complemento al desarrollo de este capítulo, se realizó una comprobación de la aplicación del método del Cronograma Valorado a un proyecto complejo de construcción dentro del sector hidroenergético. Para esta comprobación se construyó un modelo estocástico de simulación con las mismas características de los modelos de los cuatro casos de estudio expuestos en este capítulo.

Para la aplicación del modelo se planteó como caso de estudio el seguimiento y control de un cronograma para la construcción de una central hidroeléctrica

básica, considerando que cumple las características de un proyecto de construcción complejo.

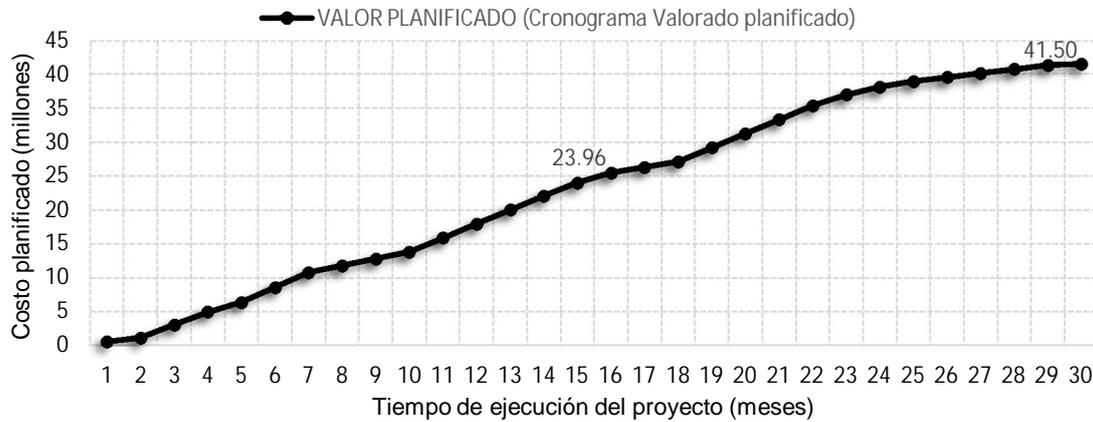
Se construyó un cronograma hipotético de proyecto constituido por veinte actividades de resumen. De acuerdo a la planificación inicial, las actividades se distribuyeron en un total de treinta periodos mensuales de ejecución, y a su vez, se estimaron los costos para cada actividad que fueron distribuidos de manera mensual, obteniendo un costo total de \$ 41.5 millones como se muestra en la Figura 4-84.

Figura 4-84: Cronograma de caso de estudio para el método Cronograma Valorado con distribución de duración y costo para cada actividad

Actividades del proyecto		Tiempo de ejecución (meses )							
		mes 1	mes 2	mes 3	mes 4	mes 5	mes 6	mes 7	-----▶ mes "n"
1	Captación	\$0.39	\$0.39	\$0.35					
2	Desarenador	\$0.27	\$0.27						
3	Tubería de acero sobre marcos H			\$0.26	\$0.30	\$0.20			
4	Canal abierto			\$0.03	\$0.33				
5	Túnel de conducción			\$1.06	\$1.25	\$1.25	\$1.25		
6	Tubería PVC enterrada					\$0.06	\$0.81	\$0.81	
	↓								
"n"	Actividad "n"								FIN

El cronograma valorado permitió la construcción de la curva Costo-tiempo que se muestra en la Figura 4-85, y que representa la línea base de comparación de avance del proyecto, según las técnicas de Cronograma Valorado.

Figura 4-85: Curva "S" Costo Planificado- Tiempo para el caso de estudio del método Cronograma Valorado



El modelo estocástico permitió definir como variables aleatorias al tiempo de duración y a los costos de cada actividad. La variabilidad se proyectó a través de funciones de distribución tipo Pert, donde se definieron valores mínimos, más probables y máximos.

En la corrida del modelo, a través del método de simulación Monte Carlo, se generó diez mil escenarios distintos de posibles situaciones de ejecución del proyecto con variabilidad en la duración y en el costo total del proyecto.

#### 4.7.1 Aplicación de la técnica del Cronograma Valorado

Al aplicar la técnica del Cronograma Valorado, se construyeron dos curvas de comparación: curva Tiempo- Costo Planificado en relación a la curva Tiempo-Costo de Simulación. Los costos de las curvas se expresaron en porcentaje.

La comparación de estas curvas representa, según la técnica, el avance del proyecto. Para verificar la eficiencia de la técnica se analiza la probabilidad de

ocurrencia de la diferencia entre el costo planificado y el costo de la simulación, dentro de un rango del 5% del monto total planificado.

Las variables de salida del modelo fueron: el costo total de la simulación, el tiempo final de la simulación, y la diferencia de los costos planificados y de simulación.

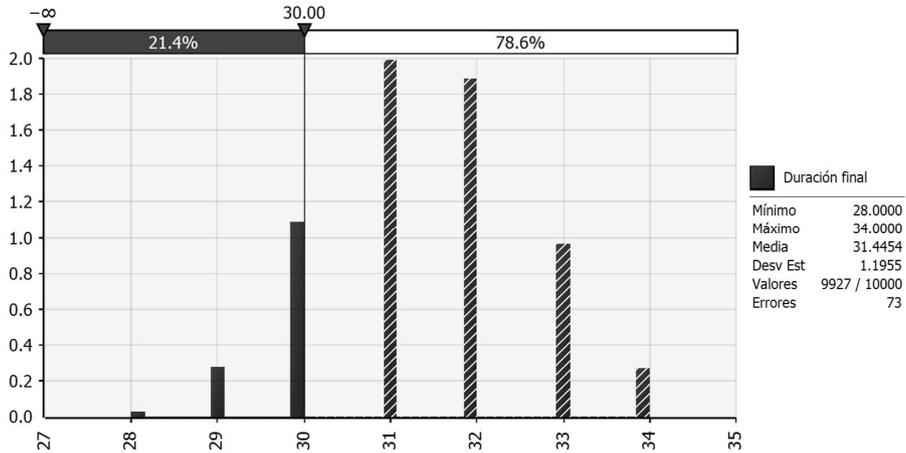
#### 4.7.2 Resultados

A continuación se detallan los resultados generales y específicos del modelo al aplicar la técnica del Cronograma Valorado.

##### a. Resultados generales del modelo

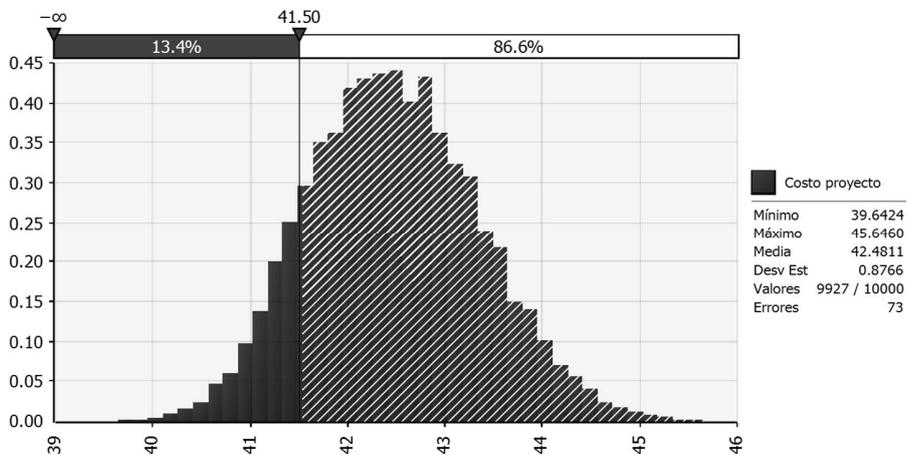
Duración del proyecto. Bajo las condiciones de la programación y de la variabilidad de las distribuciones del tiempo del cronograma del caso de estudio, el modelo calculó una probabilidad del 21.4% de ocurrencia. Esto se interpreta que la duración del proyecto tiene una probabilidad del 21.4% de conclusión en un plazo menor a los 30 meses planificados, entre un rango de variación de entre 28 y 34 meses. Lo dicho se presenta en la Figura 4-86.

Figura 4-86: Probabilidad de ocurrencia de la duración final del caso de estudio de la metodología del Cronograma Valorado



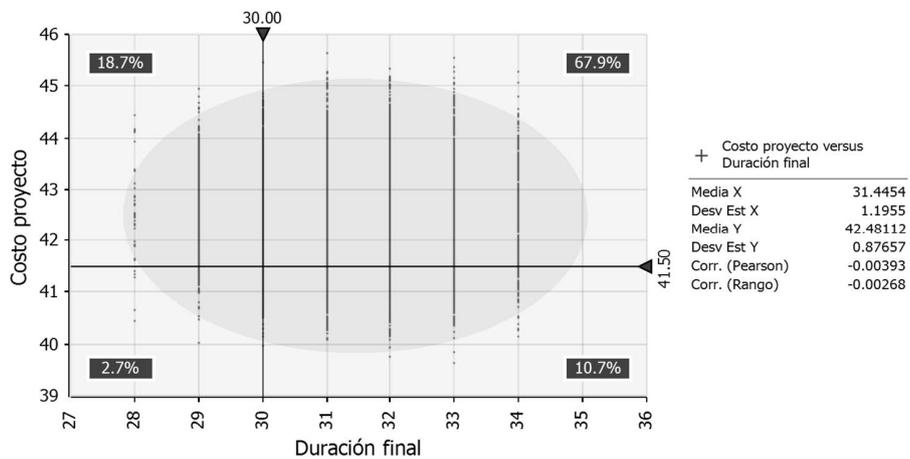
Costo del proyecto. Bajo las condiciones de la programación y de la variabilidad de las distribuciones del costo del cronograma del caso de estudio, el modelo calculó una probabilidad del 13.4% de ocurrencia. Esto se interpreta que el costo final del proyecto tiene una probabilidad del 13.4% de que se concluya en un costo menor a los 41.5 millones planificados, y con un rango de variación de entre 39.6 y 45.6 millones. Lo expuesto se presenta en la Figura 4-87.

Figura 4-87: Probabilidad de ocurrencia del costo final del caso de estudio de la metodología del Cronograma Valorado



Relación costo y duración. En la Figura 4-88 se presenta en los cuatro cuadrantes las probabilidades calculadas de la relación entre las variables duración y costo. Se interpreta que el proyecto tiene una probabilidad del 2.7% de concluir en un plazo menor a 30 meses y a la vez con un costo menor a 41.5 millones.

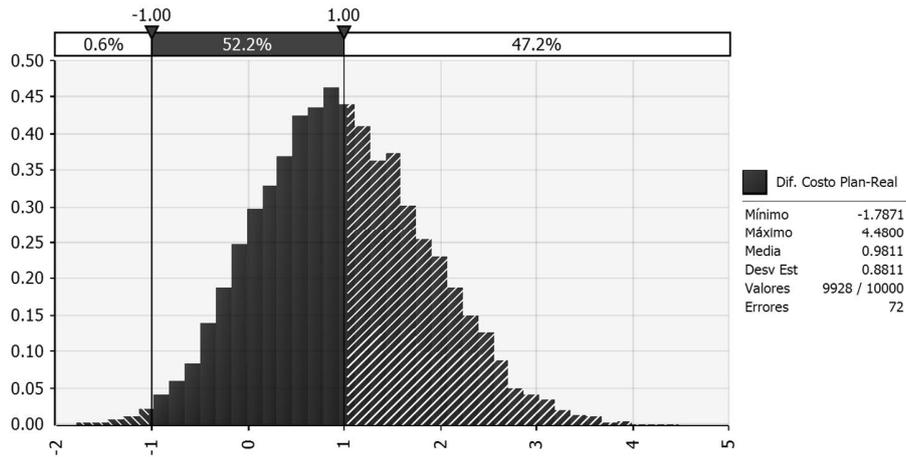
Figura 4-88: Probabilidades de la relación Costo-Duración para el caso de estudio de la metodología del Cronograma Valorado



b. Resultados específicos de la técnica del Cronograma Valorado

La comparación realizada entre el costo planificado y el costo obtenido en la simulación del modelo, genera una probabilidad del 52.2% de ajuste dentro de un rango de 2 millones en términos monetarios, como se presenta en la Figura 4-89. Lo expresado se interpreta como: según la técnica del Cronograma Valorado, la probabilidad de que el avance físico de ejecución del proyecto, se ajuste al avance planificado es de apenas el 52.2%.

Figura 4-89: Probabilidades de ajuste entre el costo planificado y el costo de simulación para el caso de estudio de la metodología del Cronograma Valorado



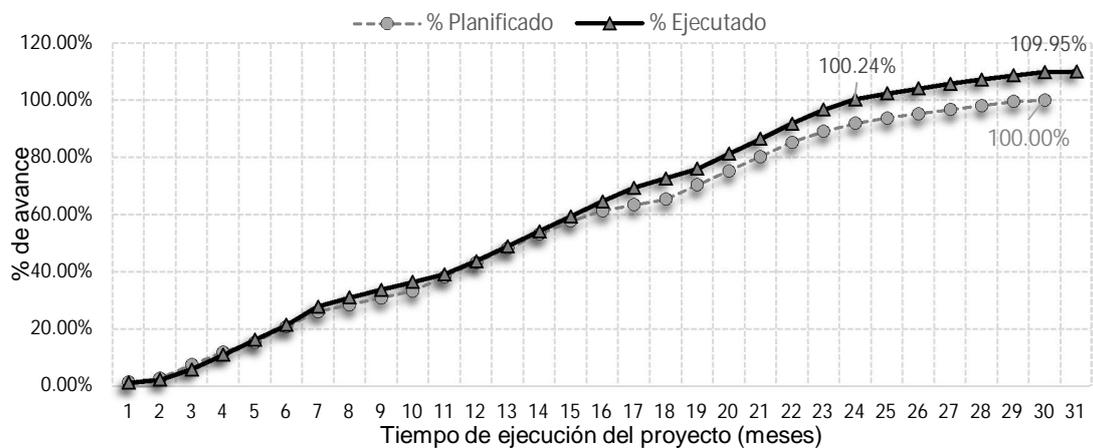
Aplicando la técnica del Cronograma Valorado, Como se muestra en la Tabla 4-100, se realizó un análisis de probabilidades del avance del proyecto durante el transcurso del tiempo de ejecución del proyecto, resultando que la técnica refleja correctamente el avance del proyecto durante los primeros periodos, sin embargo, durante el transcurso de la ejecución del proyecto se pierde completamente la eficiencia del método. Para el caso de estudio, culmina el proyecto con apenas una probabilidad del 52.20% de ajuste del método.

Tabla 4-100: Probabilidades de ajuste entre costo planificado y costo de simulación para el caso de estudio de la metodología del Cronograma Valorado

Periodo de análisis [meses]	Probabilidad de ajuste Costo Plan-Simulación [rango 5%-2 millones]
1	100.00%
5	91.30%
10	66.50%
15	48.60%
20	31.90%
25	53.20%
Fin	52.20%

En la Figura 4-90 se presenta la curva costo-duración expresada en porcentaje, de uno de los diez mil escenarios producto del modelo, donde se pudo apreciar que la técnica aplicada pierde su eficiencia a medida que transcurre el tiempo de ejecución del proyecto. Según la Figura 10 el método indica que el avance del proyecto llegó al 100% en el mes 24, sin embargo la realidad indicó que el proyecto culminó en el mes 31 y con un costo mayor al planificado.

Figura 4-90: Curva Duración- Costo Planificado en relación al Ejecutado (%) para el caso de estudio de la metodología del Cronograma Valorado



# Capítulo 5 Conclusiones e Investigaciones Futuras

## 5.1 Introducción

Durante el desarrollo de los capítulos anteriores, se analizaron una serie de metodologías existentes para el seguimiento y control de proyectos en general, pudiendo destacar como una de las más importantes, por su aceptación y aplicación a nivel mundial, la denominada Earned Value Management (EVM).

La problemática principal planteada en esta Tesis Doctoral, refiere a la falta de una metodología de seguimiento y control potente y confiable con dirección exclusiva a proyectos complejos de construcción. Lo dicho se sustenta en la estadística presentada en el Capítulo 2, donde se evidencian desviaciones importantes en sobrecostos y sobrepazos en el desarrollo de proyectos complejos de construcción a nivel mundial.

En el Capítulo 3 de esta Tesis Doctoral, se desarrolla una metodología de seguimiento y control para proyectos complejos de construcción, que busca mejorar los indicadores de rendimiento a través de una medición adecuada del avance físico- financiero, y un cálculo de pronósticos de costo y plazo confiables para la toma de decisiones anticipadas ante desviaciones en la ejecución del proyecto. A la metodología planteada se la determinó como Metodología CTCR por su ponderación en los componentes de Costo, Tiempo, Criticidad, y Riesgos.

Gran parte de los proyectos que se planifican y ejecutan en el sector hidroenergético, convergen en proyectos complejos de construcción. La construcción de grandes centrales hidroeléctricas son ejemplos típicos de estos

proyectos. En el Capítulo 4 se plantearon cuatro casos de estudio reales, constituidos por centrales hidroeléctricas construidas y planificadas en la República del Ecuador. En estos casos de estudio se aplicó la metodología CTCR y a través de modelos estocásticos de simulación y el uso de herramientas estadísticas se demostró la eficiencia de sus métricas de medición de avance físico- financiero, con pronósticos más aceptables que otras metodologías existentes.

En este Capítulo 5 se exponen las conclusiones generales y particulares más relevantes que sintetizan la presente Tesis Doctoral, y además, se dejan planteadas las posibles líneas de investigación futuras.

## 5.2 Conclusiones generales

Estas conclusiones generales hacen referencia a los resultados de la revisión bibliográfica en materia de dirección de proyectos y sus metodologías de seguimiento y control para proyectos en aplicación a proyectos complejos de construcción. Adicional, se escribe la conclusión principal que da contestación a la problemática planteada en esta Tesis Doctoral.

- Los proyectos complejos se consideran como sistemas dinámicos que se desarrollan en un entorno de gran incertidumbre e imprevisibilidad. La complejidad afecta a los proyectos como un factor que dificulta la identificación de metas y objetivos, influyendo en el plazo, el costo y la calidad de un proyecto, lo que afecta al desarrollo y la gestión del proyecto. Identificar y gestionar adecuadamente la complejidad de un proyecto en sus etapas más tempranas es un factor crítico para su éxito.

- En la ejecución de proyectos complejos de construcción, la evidencia internacional muestra estadísticas con desviaciones de importante cuantía en términos de costos y plazos de ejecución en comparación con los costos y plazos planificados. En el sector hidroenergético, distintos estudios, como los realizados por la Universidad de Oxford [10], el Institute for Energy & the Environment [11] y por Awojobi & Jenkins [12], analizaron muestras importantes de proyectos hidroeléctricos a nivel mundial, considerando desde 58 a 235 proyectos. Los resultados obtenidos resultan sorprendentes, obteniendo valores promedios que van desde el 27% hasta el 99% de incremento respecto al costo planificado e incrementos de hasta un 44% en lo relativo a los plazos.
- Para las tareas de seguimiento y control de un proyecto de construcción complejo, la técnica de Cronograma Valorado resulta elemental e ineficiente. En lo que se refiere a la técnica del EVM, ésta sí contribuye con un grupo de indicadores que permiten mejorar las actividades de seguimiento y control de proyectos complejos de construcción, sin embargo requiere ser complementada y mejorada con otras métricas y métodos en lo que se refiere a sus indicadores de gestión del tiempo o plazo y sus predicciones.
- Las técnicas del Cronograma Valorado y del Valor Ganado, utilizan como línea base para el seguimiento y control del avance físico, la curva Duración- Costo Planificado. Esto significa que las dos técnicas conciben la importancia de las actividades, ponderando exclusivamente sus costos. Con lo dicho, no se consideran otras variables fundamentales para ponderar la importancia de las actividades, como son la duración planificada, la importancia de las actividades que se encuentran en Ruta Crítica, y los riesgos que tienen ciertas actividades que podrían generar

sobrecosto y/o sobreplazo. Un proyecto de construcción complejo se caracteriza por actividades con duraciones extensas, lo que resulta fundamental considerar como variable principal, a más de los costos también sus duraciones, riesgos e importancia técnica.

- Dando contestación a la problemática principal de esta investigación, esta Tesis Doctoral ha permitido el desarrollo de una metodología para el seguimiento y control de proyectos complejos de construcción. Durante la ejecución de un proyecto, esta metodología admite el cálculo y medidas periódicas de:
  - Avance físico
  - Avance financiero
  - Pronóstico de costos y plazos a la conclusión del proyecto

La metodología se basa en estándares y recomendaciones de instituciones con gran trayectoria y experiencia a nivel mundial en materia de dirección de proyectos, como el Project Management Institute de los Estados Unidos de América con su metodología EVM, como el International Project Management Association y la Norma Internacional ISO 21500:2012.

### 5.3 Conclusiones particulares

En este apartado se presentan las conclusiones particulares principales referidas a las metodologías que basan sus métricas exclusivamente a cronogramas valorados, a EVM, y a la metodología CTCR desarrollada en esta Tesis Doctoral.

### 5.3.1 Metodologías basadas exclusivamente en cronogramas valorados

- Las técnicas y metodologías que se basan únicamente en métricas del Cronograma Valorado, calculan los costos realmente ejecutados y los compara con los costos planificados, utilizando estos mismos datos para representar avance físico y financiero.
- En el desarrollo del Capítulo 4 numeral 4.7 “Comprobación del método del Cronograma Valorado”, se demuestra que estas técnicas pierden eficiencia a medida que transcurre el tiempo de ejecución. Por los tiempos extensos de ejecución de un proyecto complejo de construcción, estas técnicas no resultan de ninguna forma eficientes en medir el avance físico. Servirían para el caso hipotético en que la ejecución del proyecto se realice sin absolutamente ninguna variación en términos de costo, duración y alcance, situación que resulta imposible en un proyecto complejo de construcción.

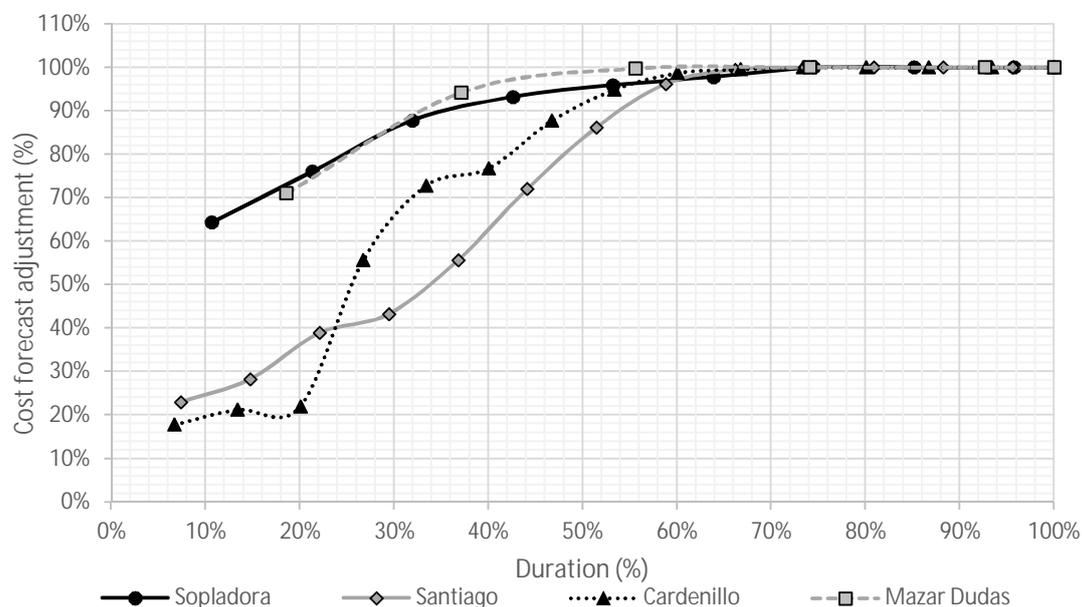
### 5.3.2 La técnica EVM

- EVM calcula y genera un grupo de indicadores que permiten un seguimiento y control del avance físico y financiero del proyecto, y además, presentan indicadores predictores de costos y duración a la conclusión del proyecto.
- De acuerdo a los resultados expuestos en el Capítulo 4 numeral 4.5 “Resultados de los modelos de simulación”, EVM representa de manera precisa un indicador de avance físico y económico del proyecto a través de sus variables Valor Ganado EV y Costo Actual AC, sin embargo es importante indicar que el avance físico lo mide en términos generales del

proyecto, esta técnica no analiza de manera individual el avance físico de las actividades que se encuentran en Ruta Crítica, lo que significa que el indicador de Valor Ganado no necesariamente representa atraso o adelanto en el plazo final del proyecto.

- A partir de los resultados presentados en la Figura 5-1, se concluye que EVM, como herramienta de pronóstico de costos de un proyecto complejo de construcción en el sector hidroenergético, ha demostrado que las predicciones mejoran su eficiencia a medida que avanza la ejecución del proyecto. Desde los periodos de inicio de ejecución se observa una tendencia de incremento del ajuste en todos los proyectos. Es decir, se observa una mejora de la eficiencia del pronóstico de costos a lo largo del tiempo. Se aprecia que aproximadamente en el 60% del plazo transcurrido en todos los proyectos se llega a una probabilidad de ajuste del 100% en el pronóstico, manteniendo este valor hasta la conclusión de los proyectos, comportamiento que da un margen de tiempo adecuado para la toma de decisiones en la corrección de desvíos en cuanto al presupuesto del proyecto.

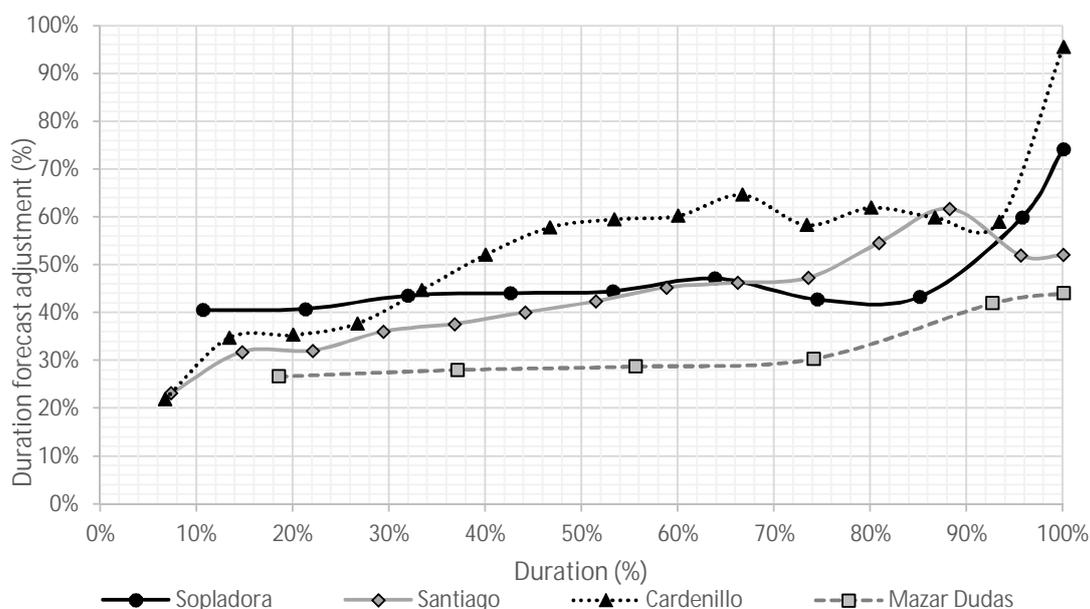
Figura 5-1: Ajuste del pronóstico de costos en el transcurso del tiempo de ejecución de los proyectos de los casos de estudio



- La técnica Earned Schedule o Cronograma Ganado como extensión de EVM, aplicada a proyectos complejos de construcción en el sector hidroenergético, ha presentado pronósticos de las duraciones con una tendencia de mejora en su precisión a medida que avanza la ejecución del proyecto, lo dicho se puede observar en la Figura 5-2, sin embargo, estas tendencias son particulares y distintas para los cuatro proyectos estudiados. Por otra parte, transcurrido el 90% de la duración planificada, se muestra que la eficiencia de las predicciones es baja, siendo el mejor pronóstico para la duración el correspondiente al proyecto Santiago, con una probabilidad de ajuste del 62% transcurrido el 88% de la duración planificada. Pasado el 90% de la duración planificada, se tiene una tendencia de mejorar sustancialmente la eficiencia de los pronósticos. Sin embargo, no son tendencias similares entre los proyectos, teniendo un rango del 44%-96% de ajuste para el 100% de la duración planificada. Con este comportamiento se puede concluir que EVM no es una técnica precisa

y no brinda confiabilidad como herramienta de pronóstico de la duración en proyectos complejos de construcción en el sector hidroenergético.

Figura 5-2: Ajuste de la predicción de la duración con Earned Schedule de EVM en el transcurso del tiempo de ejecución de los proyectos de los casos de estudio.



- Si bien los indicadores de Earned Schedule de EVM se presentan en unidades de tiempo, las s-curves que utiliza esta técnica para las proyecciones de estos indicadores se basan en costos, como EV y PV. La línea base que utiliza EVM y su extensión ES prioriza la importancia de las actividades exclusivamente por el costo y no se consideran otras variables fundamentales para ponderar la importancia de las actividades, como son la duración de cada actividad y la importancia de las actividades que se encuentran en ruta crítica y los riesgos asociados. Un proyecto complejo de producción de energía hidroeléctrica se caracteriza por actividades con duraciones extensas y actividades con altos riesgos de generar sobrecosto y/o sobreplazo, por lo que resulta fundamental considerar como variables principales, además de los costos, sus duraciones, sus riesgos y su ruta crítica.

### 5.3.3 La metodología CTCR

- La metodología CTCR de seguimiento y control desarrollada en esta Tesis Doctoral, involucra de manera integral cuatro componentes fundamentales para la ponderación de pesos de las actividades que conforman el cronograma de un proyecto, estas son:
  - El costo de las actividades
  - El plazo de cada actividad
  - Actividades en Ruta Crítica
  - Actividades de mayor riesgo para el sobreplazo y/o sobrecosto

En función de estos cuatro componentes: Costo, Tiempo, Criticidad y Riesgos, se le ha denominado metodología CTCR.

- La incorporación de análisis de las variables: Costo, Tiempo, Criticidad y Riesgos, hace que la metodología CTCR realice estimaciones de avance físico y predicciones de plazo a la conclusión del proyecto, más precisos que otras metodologías tradicionales. Los resultados obtenidos en el Capítulo 4 así lo demuestran.
- La metodología CTCR incorpora una adaptación del modelo de decisión Analytical Hierachy Process (AHP) que permite ponderar el peso de afectación de cada componente: Costo, Tiempo, Criticidad y Riesgos en el proyecto, permitiendo conseguir indicadores de avance físico-financiero y pronósticos más efectivos y con menos subjetividad.
- La aplicación de la metodología CTCR a cuatro casos de estudio en el sector hidroenergético, ha permitido demostrar de manera probabilística y estadística que es posible conseguir resultados satisfactorios, tanto en

estimar el avance físico- financiero, como en conseguir predicciones de costo y plazo a la conclusión de los proyectos con rangos razonables para la toma de decisiones ante eventuales desviaciones, incluso mejorando rendimientos de otras metodologías existentes como EVM. En la Tabla 5-1 se presenta los resultados obtenidos para la predicción de plazos, donde se muestra la mayor eficiencia de CTCR en comparación con EVM.

Tabla 5-1: Predicción efectiva del plazo a la conclusión del proyecto aplicando los métodos CTCR y EVM

Proyecto Hidroeléctrico	Plazo Estimado [meses]	Predicción efectiva CTCR [meses previos a la conclusión]	Predicción efectiva EVM[meses previos a la conclusión]
Cardenillo	75	6	5
Mazar Dudas	27	4	2
Sopladora	47	4	1
Santiago	68	5	4

- Respecto al pronóstico de costos, la Metodología CTCR se basa en las métricas propuestas por EVM, debido a su eficiencia demostrada. En la Figura 5-1 se puede apreciar el comportamiento de la probabilidad de ajuste en los cuatro casos de estudio.
- La verificación y demostración de la eficiencia de la aplicación de la metodología CTCR en los cuatro casos de estudio se sustenta en análisis estadísticos:
  - Se aplicaron análisis probabilísticos y simulación Monte Carlo para comparar la eficiencia en predicción de las duraciones o plazos del proyecto entre los métodos CTCR y EVM. Se concluye que en los cuatro casos de estudio, el método CTCR demuestra que durante todas las simulaciones de ejecución de los proyectos, es más

eficiente que EVM. Lo dicho se resume en la Figura 4-18, Figura 4-30, Figura 4-43 y Figura 4-59 del Capítulo 4 de esta Tesis Doctoral.

- Se utilizó un análisis ANOVA o análisis de varianza, para verificar la eficiencia de predicción de plazo, a través de pruebas de hipótesis, donde se determina si las medias de los plazos de la predicción en distintos periodos, son iguales al valor del plazo medio de la simulación. De los resultados obtenidos y presentados en el Capítulo 4 numeral 4.6 “Análisis estadístico de los datos”, se concluye que el método CTCR predice con mayor eficiencia que EVM, otorgando valores confiables de predicción con el tiempo suficiente para la toma de decisiones previo a la conclusión del proyecto.
  
- Generar modelos estocásticos con miles de simulaciones, y brindar un análisis estadístico confiable con las grandes bases de datos resultantes de los modelos para los cuatro casos de estudio, requieren de herramientas informáticas confiables y potentes. Para el desarrollo de esta Tesis Doctoral, se utilizó el software especializado @RISK para la simulación de diez mil iteraciones en cada modelo aplicando el método Monte Carlo y la teoría de la probabilidad. Para la aplicación de métodos estadísticos como el ANOVA, se utilizó el software especializado MINITAB® V18.
  
- La metodología CTCR, al basar sus métricas en los cuatro componentes: Costo, Tiempo, Criticidad y Riesgos, genera un mayor esfuerzo y un mayor requerimiento de mediciones y cálculos, en comparación con otros métodos, como EVM que se basa únicamente en la variable Costo. Por esta razón la aplicación de CTCR en un proyecto resulta más complejo y demanda mayores recursos de implementación y mantención.

Afortunadamente, la ejecución de un proyecto complejo de construcción, está conformado por un equipo multidisciplinario y robusto de técnicos y especialistas que gestionan el proyecto, y por tanto, no implica problema en dedicar un equipo de especialista a llevar la medición y control del proyecto, sobre todo considerando los beneficios de contar con mediciones de avances y predicciones más precisas que otros métodos.

## 5.4 Conclusiones sobre el problema de investigación

Respecto a los problemas principales que se plantearon en la investigación de esta Tesis Doctoral, se puede concluir:

- Sobre la interrogante: ¿Son eficientes los métodos o técnicas tradicionales de seguimiento y control de proyectos para su aplicación en un proyecto complejo de construcción?, esta investigación indica que no existe una metodología o técnica tradicional que permita manejar eficientemente todos los principales componentes de un proyecto complejo de construcción como: avance físico, avance financiero, pronóstico del costo y del plazo a la conclusión del proyecto.

EVM es una de las técnicas tradicionales más utilizadas a nivel mundial y que permite métricas completas para el seguimiento y control de proyectos, sin embargo, en esta investigación se ha demostrado que no es eficiente con los indicadores de avance físico y pronóstico de plazos, debido principalmente a que sus cálculos se basan en ponderaciones exclusivas de costos y no considera en sus indicadores las actividades que se encuentran en ruta crítica, lo que genera incertidumbre en las mediciones de avance físico y pronósticos de plazos.

- Sobre la interrogante: ¿Es posible el desarrollo de una metodología de seguimiento y control de proyectos que permita mejorar la eficiencia de las metodologías tradicionales al ser aplicada en proyectos complejos de construcción?, esta investigación indica que sí es posible mejorar la eficiencia de las metodologías tradicionales de seguimiento y control de proyectos. Esta Tesis Doctoral presenta una metodología denominada CTCR que permite incorporar las variables: costo, tiempo, criticidad y riesgos en sus métricas, lo que han generado métricas de avance físico y pronósticos de plazo más eficientes que las metodologías tradicionales. Lo indicado se ha comprobado a través de métodos estadísticos en esta Tesis Doctoral.

## 5.5 Investigaciones futuras

Al finalizar el desarrollo de esta Tesis Doctoral, y dentro de esta misma línea, se han generado nuevos temas de investigación que podrían estudiarse en el futuro, sobre todo pensando en la importancia del aporte que puede generarse en materia de dirección de proyectos complejos de construcción. A continuación se describen algunas posibles investigaciones futuras.

- Los casos de estudio tomados en esta Tesis Doctoral consisten en proyectos hidroeléctricos, que son proyectos de construcción con alto grado de complejidad, debido al número de ingenierías involucradas de manera paralela en tareas como:
  - Construcción de infraestructuras civiles y arquitectónicas
  - Obras subterráneas
  - Construcción y montaje de equipamiento hidromecánico
  - Construcción y montaje de equipos eléctricos y electrónicos
  - Manejo ambiental de zonas endémicas

- Manejo de recursos hídricos
- Mantener la seguridad industrial y salud, entre otras.

Por tanto, estos casos de estudio son muy completos desde el punto de vista de la complejidad, sin embargo, sería muy importante poder estudiar y verificar la eficiencia de la metodología CTCR en aplicación a proyectos complejos de construcción dentro de otros sectores industriales.

- La relativa complejidad que demanda la aplicación de la metodología CTCR en un proyecto, podría disminuirse si se estudia y desarrolla una herramienta informática o software que permita realizar los cálculos y métricas del método de manera más directa y rápida. El desarrollo de esta herramienta permitiría ahorrar recursos humanos y tiempo dentro de la gestión de la ejecución de un proyecto complejo de construcción.
- Una de las actividades fundamentales para que una metodología de seguimiento y control de proyectos tenga la eficiencia adecuada, es la medición física de avance de las tareas. De la adecuada medición del avance de las tareas depende el éxito de metodologías como EVM y CTCR, en tal virtud, una nueva línea de investigación sería proponer una metodología exclusiva con procedimientos adecuados para la medición de avances físicos de las tareas fundamentales durante la ejecución de un proyecto complejo de construcción.
- La planificación y programación de todo proyecto inicia con la construcción de una Estructura de Desglose de Trabajo (EDT), y por tanto, el éxito de toda metodología de seguimiento y control de proyectos depende de la EDT. Una nueva investigación podría definir una metodología exclusiva con procedimientos que permitan definir adecuadamente la EDT de un proyecto complejo de construcción.

- Una nueva línea de investigación podría enfocarse en un análisis y evaluación de la eficiencia de los métodos de apoyo, como: Cadena Crítica, Ruta Crítica, PERT, entre otros, en aplicación a proyectos complejos de construcción. En el Capítulo 2 “Estado del Arte” de esta Tesis Doctoral, se realizó una breve revisión de estos métodos de apoyo en el seguimiento y control de proyectos.
- Esta Tesis Doctoral realizó la comprobación de la eficiencia de la metodología CTCR, a través de la construcción de modelos de simulación de proyectos reales en el sector hidroenergético. Una nueva línea de investigación sería realizar una comprobación de la metodología CTCR, a través de su aplicación en la ejecución real de proyectos complejos de construcción, contrastando con los resultados logrados en los modelos de simulación.

## Bibliografía

- [1] D. Baccarini, «The concept of project complexity-a review,» International Journal of Project Management, vol. 14, nº 4, pp. 201-204, 1996.
- [2] Transportation Research Board, Guide to Project Management Strategies for Complex Projects, Washington, D.C.: National Academy of Sciences, 2015.
- [3] S. W. Azim, «Understanding and Managing Project Complexity,» University of Manchester, 2010.
- [4] B. Moreno, G. Martínez y F. Alegre, «La Complejidad en los Proyectos de Ingeniería. Una Aproximación a la Dimensión Social desde el Estudio de un Caso,» Granada, 2015.
- [5] G. Fernández, J. Pajares y L. Onieva, «Implanación de Indicadores de Rendimiento para el Control de Proyectos,» Cádiz, 2017.
- [6] F. Acebes , j. Pajares, J. Galán y A. López, «Monitorización y Control de Proyectos Utilizando Metodología de Valor Ganado y Simulación de Monte Carlo,» Alcañiz, 2014.

- [7] PMI, La guía de los fundamentos para la dirección de proyectos (Guía del PMBOK), Sexta ed., Pennsylvania: Project Management Institute, 2017.
- [8] J. Sánchez Montoya y A. Cuadros Mejía, «Análisis de Técnicas de Seguimiento y Control de Proyectos. Aplicación en la Industria de Construcción de Botes,» Revista Ciencias Estratégicas, vol. Vol. 22, nº No. 31, pp. 51-66, 2014.
- [9] L. Sánchez y L. Solarte, «El cuerpo del conocimiento del Project Management Institute- PMBOK Guide, y las especificidades de la gestión de proyectos. Una revisión crítica,» Innovar Journal, vol. 20, nº 37, pp. 89-100, 2010.
- [10] A. Ansar, B. flyvbjerg, A. Budzier y D. Lunn, «should we build more large dams? the actual costs of hydropower megaproject development,» Energy Policy, vol. 69, pp. 43-56, 2014.
- [11] B. Sovacool, A. Gilbert y D. Nugent, «An international comparative assessment of construction cost overruns for electricity infrastructure,» Energy Research & Social Science, vol. 3, pp. 152-160, 2014.

- [12] O. Awojobi y G. P. Jenkins, «Were the hydro dams financed by the World Bank from 1976 to 2005 worthwhile?,» *Energy Policy*, vol. 86, pp. 222-232, 2015.
- [13] H. Alzraiee, T. Zayed y O. Moselhi, «Dynamic planning of construction activities using hybrid simulation,» *Automation in Construction*, vol. 49, pp. 176-192, 2015.
- [14] P. Urgilés, J. Claver y M. A. Sebastian, «Analysis of the Cost Schedule and Earned Value Techniques for the Monitoring and Control of Complex Construction Projects,» de 22nd International Congress on Project Management and Engineering, Madrid, 2018.
- [15] L. S. Cardona-Meza y G. Olivar-Tost, «Modeling and Simulation of Project Management through the PMBOK Standar Using Complex Networks,» *Complexity*, vol. 2017, n° Article ID 4791635, p. 12 pages, 2017.
- [16] Palisade Corporation, «Palisade,» [En línea]. Available: <https://www.palisade.com/>. [Último acceso: 19 12 2018].
- [17] Palisade Corporation, «User´s Guide @Risk: Risk Analysis and Simulation Add-In for Microsoft Excel,» Palisade, Ithaca NY, 2015.

- [18] Project Management Institute, Inc (PMI), Fundamentos para la Dirección de Proyectos PMBOK, 6 ed., P. M. I. PMI, Ed., Newtown Square: PMI, 2017.
- [19] International Project Management Association IPMA, «IPMA Project Excellence Baseline (IPMA ICB). Version 1.0,» IPMA, Amsterdam-The Hetherlands, 2016.
- [20] Asociación Española de Normalización y Certificación AENOR, «Norma Internacional ISO 21500:2012,» AENOR, Madrid-España, 2012.
- [21] M. Ammen y M. Jacob, «Complexity in projects: A Study of Practitioners Understanding of Complexity in Relation to Existing Theoretical Models,» Umea school of Business, Suecia, 2010.
- [22] N. Sapag, R. Sapag y J. Sapag, Preparación y Evaluación de Proyectos, Mexico D.F.: McGRAW-HILL / INTERAMERICANA, 2014.
- [23] P. Lledó, DIRECTOR DE PROYECTOS Cómo Aprobar el Examen PMP Sin Morir en el Intento, 6ta ed., USA: pablolledo, 2017.
- [24] V. Cruz-Machado y P. Rosa, «Modelo de Planificación Basado en Construcción Ajustada para Obras de Corta Duración,» Información Tecnológica, vol. 18, nº 1, pp. 107-118, 2007.

- [25] J. San Cristóbal, «The S-curve envelope as a tool for monitoring and control of projects,» *Procedia Computer Science*, n° 121, pp. 756-761, 2017.
- [26] L. González, D. Kalenatic y K. Moreno, «Metodología integral y dinámica aplicada a la programación y control de proyectos,» *Revista de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Antioquia*, n° 62, pp. 21-32, 2012.
- [27] T. M. Bienvenue y R. P. Luc Cassivi, «Project Planning and Control in Social and Solidarity Economy Organizations: A Literature Review,» *Procedia Computer Science*, n° 121, pp. 692-698, 2017.
- [28] J. San Critóbal, «Complexity in Project Management,» *Procedia Computer Science*, n° 121, pp. 762-766, 2017.
- [29] C. Brockmann y K. Kähkönen, «Evaluating Construction Project Complexity,» *Management of Construction: Research to Practice Conference Proceedings, Joint CIB International Symposium Montreal*, vol. 2, pp. 716-727, 2012.
- [30] S. Kermanshachi, B. Dao, J. Shane y S. Anderson, «Project Complexity Indicators and Management Strategies- A Delphi Study,» *Procedia Engineering*, vol. 145, pp. 587-594, 2016.

- [31] International Project Management Association IPMA, «ICB- IPMA Competence Baseline Version 3.0,» IPMA, Nijkerk - The Netherlands, 2006.
- [32] G. Widforss y M. Rosqvist, «The Project Office as Project Management Support in Complex Environments,» *Procedia Computer Science*, vol. 64, pp. 764-770, 2015.
- [33] B. Dao, S. Kermanshachi, J. Shane, S. Anderson y E. Hare, «Identifying and meansuring project complexity,» *Procedia Engineering*, vol. 145, pp. 476-482, 2016.
- [34] B. P. Dao, «Exploring And Measuring Project Complexity,» Tesis doctoral Texas A&M University, College Station - Texas, 2016.
- [35] G. Montero, «DISEÑO DE INDICADORES PARA LA GESTIÓN DE PROYECTOS,» Universidad de Valladolid, Valladolid.
- [36] S. Burneo y R. Delgado, «Diseño de un Sistema de Gestión de Proyectos para la Vivienda Rural en el Sur de Ecuador,» *Revista Ciencias Estratégicas*, vol. 23, nº 34, pp. 237-248, 2015.
- [37] J. Sánchez y A. Cuadros, «Análisis de Técnicas de Seguimiento y Control de Proyectos. Aplicación en la Industria de Construcción de Botes,» *Revista Ciencias Estratégicas*, vol. 22, nº 31, pp. 51-66, 2014.

- [38] IS Soluciones Cía. Ltda., Manual Interpro 2010 Ejecución y Fiscalización, Cuenca: IS Soluciones Cía. Ltda., 2010.
- [39] e-Strategia Consulting Grup TM, Gobierno Por Resultados - GPR GUIA METODOLÓGICA, Quito: e-Strategia Consulting Andes, 2014.
- [40] G. d. I. Á. Alpízar Ávalos, «Aplicación de Lean Construction a través de la metodología Last planner a proyectos de vivienda social de FUPROVI,» INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA, 2017.
- [41] R. Ramos Matta y S. Salvador Sánchez, «Evaluación de la Aplicación del Sistema Last Planner en la Construcción de Edificios Multifamiliares en Arequipa,» Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas UPC, Lima, 2013.
- [42] D. Ocampo Quirola, «Lecciones Sobre la Implementación del Last Planner System,» UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA, Loja, 2011.
- [43] I. Sanchis Mestre, «Last Planner System Un Caso de Estudio,» Ponteficia Universidad Católica de Chile, Santiago de Chile, 2013.
- [44] J. Letelier Osés, «Análisis en el tiempo de indicadores de control de avance utilizados en el software computacional "IMPERA" para pronosticar efectos futuros en proyectos de construcción,» Universidad de Chile, Santiago de Chile, 2014.

- [45] R. Fuente Juridías, Método del Valor Ganado (EVM): Aplicación en la gestión de proyectos de edificación en España, Madrid: Universidad Europea LAUREATE INTERNATIONAL UNIVERSITIES, 2016.
- [46] R. Solís, G. Corona y A. García, «The Use of Project Time Management Processes and the Schedule Performance of Construction Projects in Mexico,» Journal of Construction Engineering, n° Article ID 868479, p. 9 pages, 2015.
- [47] A. Ziolkowska y M. Plonski, «Application of the EVM method and its extensions in the implementation of construction objects,» Engineering Structures and Technologies, vol. 7, n° 4, pp. 189-196, 2015.
- [48] A. Jrade y J. Lessard, «An Integrated BIM System to Track the Time and Cost of Construction Projects: A Case Study,» Journal of Construction Engineering, n° Article ID 579486, p. 10 pages, 2015.
- [49] Y.-H. Kwak y F. T. Anbari, «History, practices, and future of earned value management in government: perspectives from NASA,» Project Management Journal, vol. 43, n° 1, pp. 77-90, 2012.
- [50] Y. Jung, B. Suk Moon, Y. Myung Kim y W. Kim, «Integrated Cost and Schedule Control Systems for Nuclear Power Plant Construction:

- Leveraging Strategic Advantages to Owners and EPC Firms,» Science and Technology of Nuclear Installations, nº Article ID 190925, p. 13 pages, 2015.
- [51] M. R. Feylizadeh, «Manufacturing Performance Measurement Using Fuzzy Multi-Attribute Utility Theory and Z-Number,» Transactions of FAMENA, vol. XLII, nº 1, pp. 37-49, 2018.
- [52] B. Zohoori, A. Verbraeck, M. Bagherpour y M. Khakdaman, «Monitoring production time and cost performance by combining earned value analysis and adaptive fuzzy control,» Computers & Industrial Engineering, p. 33 pages, 2018.
- [53] G. Hidalgo Martins y M. Gechele Cleto, «Value Stream Mapping and Earned Value Analysis: a case study in the paper packaging industry in Brazil,» de 22nd International Conference on Production Research, Brazil, 2013.
- [54] M. Bagherpour, A. Zareei y S. Noori, «Designing a control mechanism using earned value analysis: an application to production environment,» The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 49, pp. 419-429, 2009.
- [55] W. H. Lipke, Programación Ganada Una extensión de la Gestión del Valor Ganado para destinar el desempeño del cronograma, Valencia: Publicación Electrónica, 2016.

- [56] Consorcio Consultor HIDROAUSTRAL, «Informe Mensual Resumen Ejectuvio No 73 FISCALIZAICÓN PROYECTO PAUTE SOPLADORA,» HIDROAUSTRAL, Cuenca, 2017.
- [57] OBS Business School, «OBS Business School,» OBS, 2019. [En línea]. Available: <https://www.obs-edu.com/int/blog-project-management/diagramas-de-gantt/que-es-un-diagrama-de-gantt-y-para-que-sirve>. [Último acceso: 13 agosto 2019].
- [58] E. Vázquez García, C. Amiama Ares y M. Barrasa Rioja, «Cadena crítica: dimensionamiento de los buffers del proyecto,» de 21th International Congress on Project Management and Engineering, Cádiz - España, 2017.
- [59] U. A. Perez de Eulate y A. Oyarbide Zubillanga, «Aplicación de la "Cadena Crítica" al sector de la construcción: un caso particular,» de XI Congreso Internacional de Ingeniería de Proyectos, Lugo, 2007.
- [60] K. Araszkieńwicz, «Application of Critical Chain Management in Construction Projects Schedules in a Multi-Project Environment: a Case Study,» Procedia Engineering, vol. 182, pp. 33-41, 2017.
- [61] M. F. García Gutiérrez, «Análisis de Aplicabilidad y Beneficios del método de la Cadena Crítica (CCPM) en Proyectos de Ingeniería y Construcción,»

- Universidad de Chile Facultad de Ciencias y Matemáticas, Santiago de Chile, 2014.
- [62] J. San Cristóbal, «The S-curve envelope as a tool for monitoring and control of projects,» *Procedia Computer Science*, vol. 121, pp. 756-761, 2017.
- [63] P. Urgilés, J. Claver y M. Á. Sebastián, «Analysis of the Earned Value Management and Earned Schedule Techniques in Complex Hydroelectric Power Production Projects: Cost and Time Forecast,» *Complexity*, n° ID 3190830, p. 11 pages, 2019.
- [64] R. W. Saaty, «The analytic Hieracchy Process- What it is and how it is used,» *Mathl Modelling*, vol. 9, n° 3-5, pp. 161-176, 1987.
- [65] J. Aguarón, M. Escobar y J. Moreno-Jiménez, «Consistency stability intervals for a judgement in AHP decision support systems,» *European Journal of Operational Research*, vol. 145, n° 2, pp. 382-393.
- [66] J. Aznar Bellver y F. Guijarro Martínez, *Nuevos métodos de valoración. Modelos multicriterio*, Valencia: Universidad Politécnica de Valencia, 2012.
- [67] J. Claver Gil y M. Á. Sebastián, *El Proceso Analítico Jerárquico. Aplicación al estudio del patrimonio industrial inmueble*, Madrid: UNED, 2015.

- [68] A. González y R. Ordóñez, «Análisis del Impacto en la Red Eléctrica al Adicionar Nueva Capacidad en la CNLV,» Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria México, 2011.
- [69] T. Saaty, «What is the Analytic Hierarchy Process?,» NATO ASI Series, vol. F48, 1988.
- [70] J. C. Osorio Gómez y J. P. Orejuela Cabrera, «El proceso de análisis jerárquico (AHP) y la toma de decisiones multicriterio. Ejemplo de aplicación,» Scientia et Technica Año XIV, nº 39, pp. 247-252, 2008.
- [71] G. Fernández Barberis y M. Escribano Ródenas, «La ayuda a la decisión multicriterio: orígenes, evolución y situación actual,» Historia de la probabilidad y de la estadística VI, pp. 243-260, 2012.
- [72] M. Cabeza y S. Torra, El Riesgo en la Empresa, Barcelona: Palisade Corporation, 2007.
- [73] C. Fullana Belda y E. Urquía Grande, «Los Modelos de Simulación: Una Herramienta Multidisciplinar de Investigación,» Universidad Autónoma de Madrid. Fundación General, Madrid, 2009.
- [74] J. R. González Dan, Tesis Doctora: Introducción del Factor Humano al Análisis de Riesgo, Barcelona: Universidad Politécnica de Catalunya, 2015.

- [75] D. R. Anderson, D. J. Sweeney, T. A. Williams, J. D. Camm y K. Martin, Métodos cuantitativos para los negocios, Mexico D.F.: Cengage Learning Editores S.A., 2011.
- [76] A. Garrido y E. Conesa, «Simulación por el método de MOnTe Carlo para generar criterios de aceptación en el control de calidad de productos de construcción,» Informes de la Construcción, vol. 61, n° 515, pp. 77-85, 2009.
- [77] M. Vanhoucke, «An Overview of Recent Research Results and Future Research Avenues Using Simulation Studies in Project Management,» ISRN Computational Mathematics, vol. 2013, n° Article ID 513549, p. 19 pages, 2013.
- [78] D. Muñoz y D. Muñoz, «Planeación y Control de Proyectos con Diferentes Tipos de Precedencias Utilizando Simulación Estocástica,» Información Tecnológica, vol. 21, n° 4, pp. 25-33, 2010.
- [79] Consorcio Pöyry - Caminosca Asociados, «Estudios de Prefactibilidad, Factibilidad y Diseños Definitivos para la Licitación de la Construcción del proyecto hidroeléctrico CArdenillo,» Corporación Eléctrica del Ecuador CELEC EP, Cuenca, 2013.
- [80] American Association of Cost Engineering AACE International, «Recommended Practice No. 66R-11: Selecting probability distribution

functions for use in cost and schedule risk simulation models,» AACE International, USA, 2012.

[81] Oracle Company, «Oracle,» [En línea]. Available: <https://www.oracle.com/applications/crystalball/>. [Último acceso: 19 12 2018].

[82] Real Options Valuation, inc., «Real Option Valuation,» [En línea]. Available: <http://www.realoptionsvaluation.com/>. [Último acceso: 19 12 2018].

[83] Minitab, LLC., «Minitab,» 12 07 2019. [En línea]. Available: <https://www.minitab.com/es-mx/company/>.

[84] Ministerio de Electricidad y Energía Renovable, «Plan Maestro de Electricidad 2016-2025,» MEER, Quito, 2017.

[85] CONSEJO NACIONAL DE ELECTRICIDAD, «Plan Maestro de Electrificación 2007-2016,» CONELEC, Quito, 2007.

[86] CONSEJO NACIONAL DE ELECTRICIDAD, «Plan Maestro de Electrificación 2012- 2021,» CONELEC, MEER, Quito, 2012.

- [87] M. R. Peláez Samaniego y J. L. Espinoza Abad, Energías Renovables en el Ecuador: situación actual, tendencias y perspectivas, Cuenca-Ecuador: Universidad de Cuenca, 2015.
- [88] B. Sovacool, D. Nugent y A. Gilbert, «Construction Cost Overruns and Electricity Infrastructure: an Inavoidable Risk?,» The Electricity Journal, vol. 27, pp. 112-120, 2014.
- [89] O. awojobi y G. P. Jenkins, «Managing the Cost Overrun Risks of Hydroelectric Dams: An Application of Reference Class Forecasting Techniques,» Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 63, pp. 19-32, 2016.
- [90] P. E. Love, X. Wang, C.-p. Sing y R. L. Tiong, «Determining the Probability of Project Cost Overruns,» Journal of Construction Engineering and Management, vol. 139, pp. 321-330, 2013.
- [91] MINISTERIO DE ELECTRICIDAD Y ENERGIA RENOVABLE, «Informe Rendición de Cuentas 2014,» MEER, Quito, 2014.
- [92] M. Campero, «Rol de los principios de administración de proyectos en el manejo de contratos de obras civiles,» Ingeniería de Construcción, vol. 28, nº 1, pp. 81-94, 2013.

- [93] Ministerio de Electricidad y Energía Renovable, «Plan Maestro de Electricidad 2016-2017,» MEER, Quito, 2017.
- [94] A. Rodríguez, L. Alarcón y E. Pellicer, «La Gestión de la Obra desde la perspectiva del Último Planificador,» Revista de Obras Públicas, nº 3.518, 2011.
- [95] L. Ugas, «La gestión de los proyectos en las empresas del sector energético Caso: Enlven-Carbozulia,» Télématique, vol. 7, nº 2, pp. 70-97, 2008.
- [96] A. Garrido y E. Conesa, «The Monte Carlo methods for use as criteria generator in construction products quality control,» Informes de la Construcción, vol. 61, nº 515, pp. 77-85, 2009.
- [97] J. Zhu, Q. Shi, P. Wu, Z. Sheng y X. Wang, «Complexity Analysis of Prefabrication Contractors' Dynamic Price Competition in Mega Projects with Different Competition Strategies,» Complexity, vol. 2018, nº Article ID 5928235, p. 9 pages, 2018.
- [98] J. R. San Cristóbal, L. Carral , E. Díaz y J. A. Fraguera, «Complexity and Project Management: A General Overview,» Complexity, vol. 2018, nº Article ID 4891286, p. 10 pages, 2018.

- [99] W. Lipke, O. Zwikael, K. Henderson y F. Anbari, «Prediction of project outcome The application of statistical methods to earned value management and earned schedule performance indexes,» *International Journal of Project Management*, vol. 27, pp. 400-407, 2009.