

UNIVERSIDAD DE NAVARRA  
ESCUELA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES  
SAN SEBASTIÁN



**tecnun**  
Universidad  
de Navarra

Proyectos de construcción: determinación de causas  
principales de retraso y desarrollo de modelos  
estadísticos para la mejora.

MEMORIA

que para optar por el Grado de Doctor  
por la Universidad de Navarra presenta

**Natalia Carolina Rudeli Ametrano**

Bajo la supervisión de  
Dr. Elisabeth Viles Díez y  
Dr. Adrián Santilli Almaraz

Donostia-San Sebastián, Noviembre 2019



# AGRADECIMIENTOS

---

Desde estas líneas pretendo expresar mi más sincero agradecimiento a todas aquellas personas que durante estos años de trabajo han estado a mi lado.

Quisiera agradecer a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Montevideo por depositar su confianza en mí y por ser mi guía durante todo el proyecto. Especialmente quisiera mostrar mi gratitud a Adrián Santilli, co-director de este proyecto, y director de tantos otros, por tener siempre la puerta abierta, por la paciencia y dedicación sin las cuales hubiera sido imposible haber logrado tanto. Hago extensivo este agradecimiento a Claudio Ruibal, decano de la Facultad, que desde mis comienzos en la investigación ha apostado por mi crecimiento.

Agradecer a TECNUN que han confiado en mí la responsabilidad de llevar a cabo esta investigación a distancia, ayudándome a sentirme presente a pesar de estar lejos. A Iñigo, que me abrió las puertas en los comienzos. A todos mis colegas del Departamento de Organización Industrial que me han acompañado en este recorrido y de los que he aprendido muchísimo. A Lourdes, que con su sabiduría también ha formado parte del desenlace de este proyecto, encaminándolo en momentos de incertidumbre. Especialmente quisiera agradecerle a Eli, quien me ha acompañado, enseñado y alentado en todo momento. Sus invaluable aportes su comprensión, dedicación y sus palabras de aliento tienen como fruto este trabajo.

A mis cuatro abuelos, dos que me cuidan desde el cielo y otros dos que me han acompañado en estos años de estudio. A mis dos tías Silvia, que ambas me han dado todo su apoyo y amor incondicional. A mi hermano, que me acompaña en la vida desde siempre, por su gran cariño y preocupación y a Bettina, mi hermana de la vida.

## Agradecimientos

---

A Augusto, quien ha escuchado cada uno de los problemas que han surgido, ha buscado soluciones y se preocupa incondicionalmente por mí. La persona que siempre está, que es mi inspiración y mi motivación.

Y mi mayor agradecimiento se lo debo a mis padres, por apoyarme en este largo camino, por enseñarme a luchar, a superarme y siempre dar lo mejor. Sin ellos nunca habría sido posible realizar este sueño.

# RESUMEN

---

A pesar de que ha sido demostrada la importancia del desarrollo de infraestructuras edilicias a lo largo del tiempo, la industria de la construcción suele sufrir de una problemática recurrente: los problemas de retraso en la entrega de los proyectos. Es por ello que esta investigación se centra en la mejora del proceso de planificación y control de los proyectos de construcción con el objetivo de reducir los tiempos de entrega de los mismos.

Primeramente, mediante un estudio de la literatura existente se han determinado las principales causas de retraso de proyectos de construcción, pudiendo englobarlas en: problemas durante la ejecución, problemas financieros y problemas con la mano de obra.

Posteriormente se han desarrollado modelos predictivos en base a datos reales para ser utilizados como herramientas de gestión. Estos modelos de pronóstico permitirán a los gestores de proyectos controlar el comportamiento de los proyectos según van avanzando las obras. De esta forma será posible prever como va a ser el comportamiento final de los proyectos y actuar, si fuera necesario, con el fin de minimizar los retrasos.

En concreto, se ha desarrollado un modelo de pronóstico basado en una taxonomía de los comportamientos de los cronogramas de obra. Este modelo de pronóstico, basado en el uso de análisis de conglomerados, permite al usuario clasificar su proyecto en alguno de los comportamientos típicos de los proyectos de construcción definidos. De este modo, en un estado intermedio de la obra, se puede llegar a tener una idea de las tendencias de comportamiento futuro del proyecto y tomar medidas de ajuste si son necesarias. Análogamente a este modelo, se ha determinado también una taxonomía del comportamiento de los flujos de caja de los proyectos de construcción, en este caso, con el fin de pronosticar el comportamiento financiero de los proyectos. El error medio

cuando se han pronosticado el comportamiento de nuevos proyectos de construcción a partir de las taxonomías de clasificación de proyectos de construcción ha resultado ser de 3,6%.

Finalmente se ha desarrollado un modelo predictivo basado en el uso de Cadenas de Markov, que permite predecir el comportamiento futuro de un proyecto de construcción mes a mes, si se conoce el comportamiento pasado del mismo. Este modelo matemático, que se ajusta a medida que se conoce más historia del proyecto, ha sido capaz de predecir el avance del cronograma del mes siguiente, con un 2,4% de error medio.

Tanto el estudio de las taxonomías de comportamiento de los cronogramas de obra y de los flujos de caja conjugan un grupo de herramientas de gestión que podrán ser utilizadas por los gestores de proyecto para la mejora del avance durante el proceso de obra de proyectos de características similares.

Estos modelos matemáticos se conjugan en un paquete de herramientas que permiten a los gestores no solo tener una aproximación de la tendencia de comportamiento genérica de su proyecto, sino saber con cierta precisión como va a ser el avance físico de los proyectos en los meses subsiguientes (permitiendo a su vez realizar estimaciones financieras a corto plazo dependiendo de los avances físicos que se predicen). De este modo será posible tomar decisiones para poder ajustarse a los tiempos previstos originalmente o, en la medida de lo posible, para poder ir reduciendo los retrasos en los proyectos de construcción.

# ÍNDICE DE CONTENIDOS

---

Agradecimientos .....	i
Resumen .....	iii
Índice de contenidos .....	v
Lista de figuras .....	ix
Lista de tablas .....	xi
1. Introducción .....	1
1.1 Contexto general .....	1
1.2 Problema de investigación .....	3
1.3 Objetivos de investigación .....	3
1.4 Alcance y limitaciones .....	4
1.5 Estrategia de investigación .....	5
1.6 Esquema de la memoria .....	7
2. Estado del arte .....	9
2.1 Introducción .....	9
2.2 El problema de los retrasos en los proyectos de construcción .....	11
2.3 Causas de retraso en los proyectos de construcción .....	13
2.3.1 Antecedentes .....	13
2.3.2 Análisis de la literatura .....	26
2.4 Conclusiones .....	33
3. Objetivos y preguntas de investigación .....	35
3.1 Objetivos de investigación .....	35
3.1.1 Objetivo general y específicos .....	35
3.2 Preguntas de investigación .....	36
4. Metodología de la investigación .....	37

## Índice de Contenidos

---

4.1	Enfoque de la investigación .....	37
4.1.1	Enfoque cuantitativo .....	38
4.1.2	Enfoque cualitativo .....	39
4.1.3	Selección de método para la investigación.....	40
4.2	Estrategia de investigación .....	41
4.3	Prueba de Levene.....	42
4.4	Diagramas de Pareto.....	43
4.5	Análisis de conglomerados .....	44
4.5.1	Métodos jerárquicos de aglomeración .....	45
4.5.2	Método del vecino lejano o de distancia máxima .....	47
4.6	Cadenas de Markov.....	48
4.7	Conclusiones .....	50
5.	Causas de retraso de proyectos de construcción .....	53
5.1	Introducción .....	53
5.2	Metodología.....	54
5.2.1	Fase I: Revisión de la literatura .....	55
5.2.2	Fase II: Definición de familias de agrupamiento .....	55
5.2.2.1	Problemas administrativos .....	57
5.2.2.2	Diseño.....	58
5.2.2.3	Ejecución .....	58
5.2.2.4	Mano de obra .....	60
5.2.2.5	Maquinaria .....	60
5.2.2.6	Materiales.....	61
5.2.2.7	Clima .....	61
5.2.3	Fase III: Mejor método para medir la importancia de las causas de retraso .....	62
5.3	Familias principales de causas de retraso.....	66
5.3.1	Conclusiones.....	73



6.	Taxonomía de los proyectos de construcción en base a los tiempos de ejecución.....	77
6.1	Introducción.....	77
6.2	Metodología.....	81
6.2.1	Caracterización de la muestra.....	81
6.2.2	Análisis de Conglomerado.....	83
6.2.3	Fase de validación.....	85
6.3	Caracterización de las bases de datos.....	87
6.4	Taxonomías obtenidas.....	89
6.5	Métricas para clasificar nuevos proyectos.....	96
6.6	Conclusiones.....	100
7.	Taxonomía de los proyectos de construcción en base al flujo de fondos.....	103
7.1	Introducción.....	103
7.2	Metodología.....	107
7.2.1	Caracterización de la muestra.....	107
7.2.2	Análisis de Conglomerado.....	110
7.2.3	Selección de criterios para la clasificación.....	112
7.2.4	Fase de validación.....	113
7.2.5	Correlación entre taxonomías de cronograma de obra y flujo de caja.....	114
7.3	Caracterización de la muestra.....	115
7.4	Taxonomías obtenidas.....	117
7.5	Métricas para clasificar nuevos proyectos.....	125
7.6	Fase de validación.....	127
7.7	Relación ente comportamiento de tiempos y flujo de fondos.....	129
7.8	Conclusiones.....	136
8.	Herramienta estadística para la predicción del avance de proyectos de construcción.....	139
8.1	Introducción.....	139
8.2	Metodología.....	140

## Índice de Contenidos

---

8.3	Modelo de predicción en base a cadenas de markov.....	143
8.4	Validación estadística cruzada del modelo.....	147
8.5	Conclusiones .....	150
9.	Resumen final y conclusiones .....	151
9.1	Resumen.....	151
9.2	Limitaciones y futuras líneas de investigación .....	154
10.	Referencias .....	157
	Apéndice A – Causas de retraso en los proyectos de construcción.....	171
	Apéndice B – Bases de datos cronogramas .....	172
	Apéndice C – Base de datos de flujos de caja.....	189
	Apéndice D – Cadenas de markov.....	193
	Apéndice E – Publicaciones y congresos.....	203

## LISTA DE FIGURAS

---

Figura 1, Estrategia de Investigación .....	6
Figura 2. Análisis porcentual de la literatura referente a causas de retraso en proyectos de construcción.....	29
Figura 3, Gráfica para los índices de importancia estandarizados de las causas de retraso de proyectos de construcción.....	31
Figura 4, Familias Nivel 1 y Nivel 2 agrupadas según las fases de un proyecto de construcción.....	57
Figura 5, Causas de retraso en proyectos de construcción – grafica de valores individuales para índice estandarizado.....	63
Figura 6, Test de igualdad de varianzas para Familia Nivel 1.....	65
Figura 7, Diagrama de Pareto para el Grupo Nivel 1 – África.....	67
Figura 8, Diagrama de Pareto para el Grupo Nivel 1 – USA.....	67
Figura 9, Diagrama de Pareto para el Grupo Nivel 1 – Asia.....	68
Figura 10, Diagrama de Pareto para el Grupo Nivel 1 – Turquía.....	68
Figura 11, Diagrama de Pareto para el Grupo Nivel 1 – Europa.....	69
Figura 12, Diagrama de Pareto para el Grupo Nivel 1 – Global.....	69
Figura 13, Diagrama de Pareto para las familias Nivel 2 dentro de la Familia Nivel 1 “Ejecución” .....	71
Figura 14, Diagrama de Pareto para las familias Nivel 2 dentro de la Familia Nivel 1 “Problemas administrativos”.....	72
Figura 15, Diagrama de Pareto para las familias Nivel 2 dentro de la Familia Nivel 1 “Mano de obra” .....	72
Figura 16, Indicadores EVM y ES para caracterización del comportamiento de una obra.....	80
Figura 17, Índices EVM y ES para caracterización del comportamiento de proyectos de construcción.....	82
Figura 18, Dendrograma de similitudes utilizando método de distancia máxima .....	90

Lista de Figuras

---

Figura 19, Verificación de disimilitud de las variables de control para los 4 clústers obtenidos (SPI).....	95
Figura 20, Comportamientos tipo de proyectos de construcción en base a 90 proyectos uruguayos .....	95
Figura 21, Intervalos de confianza para el décimo 3/10t de la base de datos uruguaya.....	98
Figura 22, Intervalos de confianza para el décimo 4/10t de la base de datos uruguaya.....	98
Figura 23, Intervalos de confianza para el décimo 6/10t de la base de datos uruguaya.....	99
Figura 24, Discretización de la base de datos en décimos del tiempo planeado. ....	109
Figura 25, Gráfica de puntos individuales para la base de datos de flujos de caja .....	117
Figura 26, Gráfica de caja para la base de datos de flujos de caja –puntos fuera de rango.....	118
Figura 27, Gráfica de caja para la base de datos de flujos de caja –exclusión fila 23. ....	118
Figura 28, Gráfica de caja para la base de datos de flujos de caja –exclusión fila 23 y 29.....	119
Figura 29, Dendograma para la aglomeración de flujos de caja de proyectos de construcción.....	120
Figura 30, Gráfico de conglomerados de flujos de caja para los 82 proyectos de construcción.....	122
Figura 31, Correlación entre conglomerado C1 de cronograma y conglomerado C2 de flujo de caja .....	132
Figura 32, Correlación entre conglomerado C2 de cronograma y conglomerado C3 de flujo de caja.....	132
Figura 33, Correlación entre conglomerado C3 de cronograma y conglomerado C4 de flujo de caja .....	133
Figura 34, Correlación entre conglomerado C4 de cronograma y conglomerado C1 de flujo de caja .....	133

## LISTA DE TABLAS

---

Tabla 1, Resumen de la revisión de la literatura - causas de retraso de proyectos de construcción.....	28
Tabla 2, Valores de la base de datos de 90 proyectos de construcción uruguayos en décimos de tiempo previsto.....	88
Tabla 3, Valores de indicadores EVM y ES para la base de datos de 90 proyectos de construcción uruguayos .....	88
Tabla 4, Valores de la base de datos de 15 proyectos de construcción españoles en décimos de tiempo previsto .....	88
Tabla 5, Valores de indicadores EVM y ES para la base de datos de 15 proyectos de construcción españoles.....	89
Tabla 6, Valores de la base de datos extraída de la literatura en décimos de tiempo previsto .....	89
Tabla 7, Valores de indicadores EVM y ES para la base de datos extraída de la literatura.....	89
Tabla 8, Proceso de aglomeramiento para la base de 90 proyectos, parte 1 .....	91
Tabla 9, Proceso de aglomeramiento para la base de 90 proyectos, parte 2.....	92
Tabla 10, Proceso de aglomeramiento para la base de 90 proyectos, parte 3.....	93
Tabla 11, Centroides y límites de confianza para los conglomerados C1 y C2 obtenidos.....	93
Tabla 12, Centroides y límites de confianza para los conglomerados C3 y C4 obtenidos.....	94
Tabla 13, Regresión de los mejores subconjuntos – posibles combinaciones.....	97
Tabla 14, Valores de intervalos de confianza para la clasificación de nuevos proyectos en las taxonomías obtenidas.....	99
Tabla 15, Proyecto de construcción “El cañaveral” .....	100
Tabla 16, Caracterización de la base de datos de flujos de caja de proyectos de construcción.....	115

Lista de Tablas

---

Tabla 17, Caracterización de la base de datos de validación de flujos de caja de proyectos de construcción.....	116
Tabla 18, Caracterización de la base de datos de validación de cronogramas de proyectos de construcción.....	116
Tabla 19, Proceso de aglomeramiento para flujos de caja de 82 proyectos, parte 1 (con descarte de elementos) .....	123
Tabla 20, Proceso de aglomeramiento para flujos de caja de 82 proyectos, parte 2 (con descarte de elementos) .....	124
Tabla 21, Datos de distancias y composiciones de los conglomerados obtenidos .....	125
Tabla 22, Datos de los centroides obtenidos en el análisis de conglomerados .	125
Tabla 23, Método de regresión múltiple para los mejores sub conjuntos de flujos de caja.....	127
Tabla 24, Métricas para la clasificación de nuevos proyectos en las taxonomías determinadas.....	127
Tabla 25, Base de datos de validación de flujos de caja.....	128
Tabla 26, Clasificación de base de datos de validación en ambas taxonomías .	130
Tabla 27, Fases de construcción para la correlación entre cronogramas de obra y cronogramas financieros .....	135
Tabla 28, Avances reales porcentuales incrementales al primer décimo de las 12 cooperativas de verificación.....	144
Tabla 29, Cálculo del pronóstico de avance en el instante $x_2$ conociendo el avance en el instante $x_1$ para el proyecto de verificación O1.....	145
Tabla 30, Avances reales porcentuales incrementales de verificación para los estados $x_1, x_2, x_3, \dots, x_{10}$ .....	145
Tabla 31, Avances pronosticados porcentuales incrementales de los proyectos de verificación para los estados $x_2, x_3, x_4, \dots, x_{10}$ .....	146
Tabla 32, Tabla resumen de las diferencias entre avances reales y avances pronosticados para las 12 obras de verificación.....	147
Tabla 33, Resumen de las diferencias entre avances reales y avances pronosticados para las obras de verificación – validación cruzada II.....	149
Tabla 34, Resumen de las diferencias entre avances reales y avances pronosticados para las obras de verificación – validación cruzada III .....	149

# 1. INTRODUCCIÓN

---

## 1.1 CONTEXTO GENERAL

La provisión eficiente de los servicios de infraestructura es uno de los aspectos más importantes de las políticas de desarrollo de un país. La ausencia de una infraestructura adecuada, así como la provisión ineficiente de servicios de infraestructura, constituyen obstáculos de primer orden para la implementación eficaz de políticas de desarrollo y para la obtención de tasas de crecimiento económico que superen los promedios internacionales. (Costa, et al., 1987), (Munnell, 1990), (Canning & Pedroni, 1999), (D'émurger, 2000), (CEPAL, 2004), entre otros.

En general, es posible definir la infraestructura como el conjunto de estructuras de ingeniería e instalaciones (por lo general, de larga vida útil) que constituyen la base sobre la cual se produce la prestación de servicios considerados necesarios para el desarrollo de fines productivos, políticos, sociales y personales (BID, 2000).

Además, más allá de los beneficios económicos y de crecimiento que pueden producir el desarrollo de nueva infraestructura, se encuentra el aspecto social del acceso a las mismas. Por tanto, una parte importante de la dotación de infraestructura, sobre todo en países en vías de desarrollo, es la generación de infraestructura edilicia.

La Organización de Naciones Unidas ha sido encargada desde sus comienzos a la concreción de políticas referidas al derecho humano y a la vida digna. La vivienda adecuada fue reconocida en la Declaración Universal de Derechos Humanos de 1948, (ONU, 1948) y en el Pacto Internacional de Derechos Económicos, Sociales y Culturales de 1966 (ONU, 1996). Otros tratados internacionales de derechos humanos han reconocido o mencionado desde

entonces el derecho a una vivienda adecuada o algunos de sus elementos, como la protección del hogar y la privacidad.

A pesar del lugar fundamental que ocupa este derecho en el sistema jurídico mundial, el número de personas que no cuentan con una vivienda es creciente. Un gran número de personas viven en asentamientos, o en condiciones que no respetan sus derechos fundamentales. Otras tantas, sufren todos los años desalojos forzosos o son amenazadas con éste hecho, (ONU, 2010).

En el plano Nacional, tanto la constitución española como uruguaya protegen el derecho a una vivienda adecuada o declaran la responsabilidad general del Estado de asegurar una vivienda y condiciones de vida adecuadas para sus habitantes. A modo de ejemplo en la Constitución Española (C. España, 1978) en su artículo 47 se pronuncia: “Todos los españoles tienen derecho a disfrutar de una vivienda digna y adecuada.” Asimismo la Constitución Uruguaya (C. Uruguay, 1967) en el artículo 45 se refiere al tema de la vivienda expresando que: “Todo habitante de la República Oriental del Uruguay tiene derecho a gozar de vivienda decorosa. La ley propenderá a asegurar la vivienda higiénica y económica, facilitando su adquisición”.

Autores como (Diener, et al., 1993), (Rosenheck, et al., 1998), (Malpass, 2005) y (Clapham, 2010) en sus investigaciones referentes al bienestar de las personas, señalan que el acceso a la vivienda es un factor fundamental en la constitución de la calidad de vida de las personas. El acceso a la vivienda conforma una parte fundamental en los indicadores de “calidad de vida” y de “bienestar”, debido a que el acceso a un refugio adecuado incrementa notoriamente las posibilidades de un mejor desarrollo de la persona.

Tanto en Uruguay como en España existe una cultura de la propiedad que rige las decisiones de vida de sus ciudadanos, “el sueño de la casa propia”, (Etchezarreta, et al., 2012), (Hoekstra & Vakilzad, 2011), (Pírez, 2008). A pesar de ello, en ambos países la dificultad al acceso de vivienda y los altos costes que esto implica se reflejan en varios artículos e informes.



## 1.2 PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

A pesar de la importancia de la dotación de infraestructura y sobretodo infraestructura edilicia, la industria de la construcción suele sufrir una problemática recurrente: retrasos en la construcción de los proyectos y, por lo tanto, demora en entrega de las infraestructuras y de las viviendas. Esta problemática es la que se abordará en el trascurso de la tesis para el caso concreto de construcciones de infraestructuras edilicias.

En la literatura existen variadas referencias a la existencia de atrasos y demoras en cronogramas de obras de este tipo. (Odeyinka & Yusif, 1997), (Al-Momani, 2000), (Aibinu & Jagboro, 2002), (Frimpong & Oluwoye, 2003), (Assaf & Al-Hejji, 2006), entre otros, destacan la existencia de atrasos en obras de construcción tradicionales, obras de infraestructura, de dotación estatal, obras de construcción de viviendas sociales y viviendas sociales promovidas de forma privada.

La falta de eficiencia en la gestión de proyectos de construcción, las demoras en entregas de los productos y los retrasos en obra es una de las problemáticas principales que afectan a estos proyectos, (Kamara, et al., 2002) y (Egbu, et al., 2004). Es por ello que el objetivo de esta tesis será mejorar el proceso de construcción de infraestructuras, enfocándose en infraestructuras edilicias que promueven el acceso a la vivienda.

## 1.3 OBJETIVOS DE INVESTIGACIÓN

La investigación se centrará en la mejora del proceso de planificación y control de los proyectos de construcción. En concreto, en el proyecto de tesis se buscará poder mejorar la planificación de cronogramas y los mecanismos de control de obra para lograr corregir a tiempo desajustes que puedan provocar retrasos

En primer lugar, se buscará determinar las causas que producen los retrasos en obra y, una vez determinadas, se propondrán modelos estadísticos que sirvan

para pronosticar el comportamiento de los proyectos de construcción. El uso de las herramientas de gestión que aquí se proponen no solo pueden implicar una entrega más rápida de las viviendas e infraestructuras, sino también podrían originar una reducción de costes a las empresas constructoras debido a la minimización de los retrasos.

#### 1.4 ALCANCE Y LIMITACIONES

Dado que comprender la globalidad de las tipologías de infraestructuras existentes es muy amplio y teniendo en cuenta que el estudio concreto de la construcción de infraestructuras edilicias además conllevaría, no solo a una mejora en la dotación de infraestructuras, sino que también a una entrega más rápida de soluciones habitacionales es por lo que se ha decidido centrar la investigación en este tema.

El proyecto de tesis también plantea tres limitaciones a tener en cuenta. Por un lado, parte del estudio de la tesis incluye el análisis de las posibles causas de retraso de los proyectos de construcción. Son varios los estudios encontrados en la literatura que tratan el tema de las causas de retraso de los proyectos de construcción. Las causas que se nombran en la literatura, abarcan desde causas meramente prácticas y de ejecución hasta problemáticas con la mano de obra y aspectos del comportamiento humano. Todas las causas de retraso de proyectos de construcción que tienen que ver con las tendencias de actuación del personal serán estudiadas, pero no serán propuestos mecanismos de mejora para abordar esta problemática. Es decir, la tesis aborda la mejora relacionada con causas técnicas y/o administrativas y, por tanto, este tipo de causas relacionadas con el comportamiento laboral humano serán tenidas en cuenta en el análisis de la literatura para dimensionar su importancia relativa en el retraso global, pero no así para desarrollar modelos o propuestas de mejora.

Por otro lado, este estudio tiene la intención de comprender los problemas referidos a proyectos de construcción de mediano a gran porte. Por lo que, tanto el modelo de estudio de causas de retraso como los modelos predictivos del comportamiento se basan en proyectos de construcción de mediana a gran escala.

En principio se requieren estudios adicionales para validar los modelos de comportamiento en viviendas de pequeño porte. Igualmente, los modelos aquí presentados pueden servir como referencia para usuarios de proyectos de menores dimensiones para entender el comportamiento global de los proyectos de construcción, sirviendo como una guía en el momento del diseño y para entender los potenciales caminos que podrá tomar el proyecto.

Más aún, el modelo presentado pretende ser genérico para la determinación de comportamiento de los proyectos de construcción. Sin embargo, para la construcción de los modelos fueron utilizadas bases de datos con cantidades limitadas de proyectos de construcción. Siempre que se pueda ampliar el espectro con nuevos datos para alimentar a los modelos será posible mejorar la precisión de predicción de los comportamientos tendenciales de los proyectos de construcción.

Los resultados de esta tesis podrían considerarse como un primer paso hacia una comprensión más integral de las causas de retraso de los proyectos de construcción y la mejora del proceso a través de modelos que predicen las tendencias de comportamiento. Futuras líneas de investigación o el añadido de nuevos datos a las bases utilizadas podrán generar modelos con mayores precisiones y ajustes a las realidades cambiantes de este mercado.

## 1.5 ESTRATEGIA DE INVESTIGACIÓN

El autor (Philips & Pugh, 2000) menciona que la estrategia de investigación apoya todo el proceso de encontrar respuestas a los objetivos de investigación propuestos. El paradigma científico y la naturaleza del problema de investigación determinarán la metodología que debe adoptarse en cada caso específico para dar respuestas adecuadas a los diferentes objetivos. En otras palabras, es necesaria una comprensión clara de los resultados esperados para justificar los métodos utilizados en la búsqueda de las respuestas.

La Figura 1 se presenta un resumen de la estrategia de investigación utilizada durante el curso de esta tesis. Primero, se realizó una revisión de la literatura con los objetivos principales de encontrar información sobre las causas de retraso en

los proyectos de construcción. Este estudio de la literatura permite encontrar una brecha entre la información existente y lo que se pretende estudiar en este proyecto.

Figura 1, Estrategia de Investigación

FASE 0	FASE 1	FASE 2
<p><b>ESTADO DEL ARTE</b></p> <p><u>Objetivos:</u>                      (1) Encontrar las causas de retraso de los proyectos de construcción existentes en la literatura                      (2) Definir el problema de investigación                      (3) Encontrar información relevante para el estudio de familias de causas principales</p> <p><u>Metodología:</u>                      Revisión de la literatura utilizando las bases de datos de "Web of Science", "Scopus" y "Google Scholar" y análisis básicos estadísticos.</p> <p><u>Resultados:</u>                      (1) Listado de causas de retraso de proyectos de construcción con sus indicadores de importancia                      (2) Determinación del Gap en la literatura y definición del problema de investigación.</p>	<p><b>CAUSAS DE RETRASO DE P.C</b></p> <p><u>Objetivos:</u>                      (1) Realizar estudios estadísticos exploratorios a la base de datos de causas de retraso de proyectos de construcción y determinar las principales familias que producen los retrasos.</p> <p><u>Metodología:</u>                      Utilización de Pruebas de Levene en los indicadores de importancia, estudio del método de conteo de apariciones y utilización de diagramas de Pareto.</p> <p><u>Resultados:</u>                      Principales familias de causas de retraso de proyectos de construcción ordenadas por su frecuencia que sirven como guía para el desarrollo de las metodologías de mejora.</p>	<p><b>TAXONOMIAS DE CRONOGRAMAS DE P.C</b></p> <p><u>Objetivos:</u>                      (1) Determinar los comportamientos típicos de los cronogramas de obra de los proyectos de construcción para ser utilizados como herramienta de predicción de futuros comportamientos.</p> <p><u>Metodología:</u>                      Utilización de indicadores Earned Value Management y análisis de conglomerados.</p> <p><u>Resultados:</u>                      4 comportamientos típicos de los proyectos de construcción y validación de las taxonomías como herramienta de predicción de futuros comportamientos</p> <p><b>TAXONOMIAS DE FLUJOS DE CAJA DE P.C</b></p> <p><u>Objetivos:</u>                      (1) Determinar los comportamientos típicos de los flujos de caja de obra de los proyectos de construcción para ser utilizados como herramienta de predicción de futuros comportamientos.</p> <p><u>Metodología:</u>                      Utilización de análisis de conglomerados.</p> <p><u>Resultados:</u>                      4 comportamientos típicos de los flujos de caja de proyectos de construcción y validación de las taxonomías como herramienta de predicción de futuros comportamientos</p> <p><b>PREDICCIÓN DE COMPORTAMIENTOS FUTUROS</b></p> <p><u>Objetivos:</u>                      (1) Generar un modelo de predicción de comportamiento futuro en base a los comportamientos pasados que sea estable cuando existen cambios radicales de comportamiento en el proceso de construcción.</p> <p><u>Metodología:</u>                      Utilización de cadenas de Markov.</p> <p><u>Resultados:</u>                      Modelo matemático que a partir del estado presente permite describir en probabilidad el comportamiento futuro del proyecto de construcción.</p>

En segundo lugar, se realizaron análisis estadísticos a la base de datos de causas de retraso de proyectos de construcción recopilados en el análisis de la literatura que permiten determinar las principales causas de retraso documentadas hasta la actualidad. Posteriormente se llevaron a cabo diversos estudios estadísticos sobre bases de datos de proyectos de construcción reales con el objetivo de proponer herramientas de gestión para actuar sobre las principales causas de retraso detectadas. Se proponen tres modelos estadísticos que representan el comportamiento de los proyectos de construcción actuales y

que permiten estimar las tendencias del comportamiento de proyectos futuros en base a datos actuales. Estos modelos estadísticos proporcionan a los gestores de proyecto un marco de referencia y representan información valiosa para evaluar y tomar decisiones durante el transcurso de los proyectos de construcción.

Una breve explicación de cada una de las metodologías utilizadas para la realización de esta tesis, que muestra evidencia de la literatura que respalda su uso en condiciones similares, se presentará en capítulos posteriores.

## 1.6 ESQUEMA DE LA MEMORIA

Esta tesis está dividida en nueve capítulos principales, siendo el capítulo 1 la introducción. El Capítulo 2 presenta el estado del arte sobre las causas de retraso de proyectos de construcción y los modelos de predicción de estados futuros encontrados en la literatura. El Capítulo 3 presenta las preguntas de investigación y las hipótesis de trabajo.

El Capítulo 4 describe las metodologías utilizadas durante el transcurso de la tesis, así como el estado del arte que respalda la utilización de las mismas. El capítulo 5 explica el estudio estadístico llevado a cabo sobre la base de datos de causas de retraso recopiladas de la literatura y tiene como resultado la determinación de las causas principales. El capítulo 6 propone un estudio estadístico sobre una base de datos de proyectos de construcción para la determinación de una taxonomía del comportamiento de los cronogramas. Este estudio tiene como fin utilizar dicha taxonomía como herramienta de control durante el proceso de obra. Análogamente el Capítulo 7 presenta un estudio de una taxonomía de los flujos de caja de los proyectos de construcción. El Capítulo 8 presenta una herramienta de predicción de comportamiento futuro de los cronogramas de obra basada en el uso de Cadenas de Markov, que permite predecir a corto plazo el desenlace del proyecto con mayor precisión.

Finalmente, el capítulo 9 concluye la tesis y presenta futuras líneas de investigación. Posteriormente se muestran las referencias utilizadas y se incluyen algunos apéndices con material de apoyo.



## 2. ESTADO DEL ARTE

---

### 2.1 INTRODUCCIÓN

Se puede definir “infraestructura” como el conjunto de estructuras de ingeniería e instalaciones (por lo general, de larga vida útil) que constituyen la base sobre la cual se produce la prestación de servicios considerados necesarios para el desarrollo de fines productivos, políticos, sociales y personales (BID, 2000). Por lo tanto, uno de los factores más importantes en el desarrollo de un país viene dado por la construcción de nuevas infraestructuras y viviendas que contribuyan a mejorar la calidad de vida de las personas. La ausencia de una infraestructura adecuada constituye uno de los obstáculos de primer orden para la implementación eficaz de políticas de desarrollo y crecimiento económico, (Rozas & Sánchez, 2004).

Autores como (Munnell, 1992), (Tatom, 1993), (Gramlich, 1994) hablan del efecto cíclico que tiene el crecimiento económico en base a la inversión en infraestructuras y provisiones de viviendas. Estos autores destacan que las inversiones en infraestructura contribuyen a aumentar la productividad y el nivel de producción de la economía, este crecimiento provoca un aumento en la demanda de transporte y el suministro de servicios de infraestructura, lo que deriva en una tendencia ascendente en los retornos de las inversiones en infraestructura. Otros autores que tratan el tema son: (Costa, et al., 1987), (Munnell, 1990), (Canning & Pedroni, 1999), (D'émurger, 2000), (Esfahani & Ramirez, 2002).

Es así que se puede afirmar que la industria de la construcción es uno de los principales motores del desarrollo económico y social de un país. Genera relaciones con una gran parte de las ramas comerciales e industriales, el Estado participa por medio de la inversión en obras de infraestructura básica, vial y edificación y a su vez, el sector privado interviene especialmente en la construcción de vivienda y edificaciones.

La industria de la construcción se distingue básicamente por dos características: (1) Su movilidad permanente, debido a que sus centros de producción (que son las obras y los proyectos de construcción) son temporales en su ubicación y en el tiempo. (2) Su unicidad, debido a que las empresas constructoras elaboran cada vez un producto diferente. No hay dos proyectos de construcción iguales, (Ferrada & Serpell, 2009).

Además, la construcción se caracteriza por ser altamente competitiva y con bajos márgenes de ganancia (Carrillo, et al., 2000). Es una industria que en los últimos años ha migrado a proyectos que cada vez son más demandantes en el tiempo de entrega y en los resultados económicos que se deben obtener, por lo que el proceso de toma de decisiones tiende a ser más veloz que en el pasado (Anumba, et al., 2005).

Por otra parte, se puede decir que es una industria intensiva en conocimiento (Egbu, et al., 2004), (Carrillo, et al., 2004), ya que el desarrollo de las actividades de construcción requiere de conocimiento experto y experiencia para resolver problemas que se suelen presentar en forma de imprevistos (Anumba, et al., 2005)

La industria de la construcción enfoca su trabajo principalmente en el desarrollo de un producto final único, el que se ejecuta bajo el formato de proyectos temporales (Halpin, 2006) con un nivel de fragmentación mucho mayor al de otros sectores industriales (Pathirage, et al., 2006) debido al alto número de partes interesadas y fases involucradas en cada proyecto, (Nitithamyong & Skibniewski, 2004). Esta situación lleva habitualmente a la industria a tener una eficiencia menor a la esperada en el desarrollo de sus proyectos, (Kamara, et al., 2002) y (Nitithamyong & Skibniewski, 2004).

Tradicionalmente se ha considerado que es necesario administrar tres áreas para tener éxito en la ejecución de un proyecto de construcción: la calidad, el coste y el tiempo. La calidad es determinante en la satisfacción de los usuarios y el cumplimiento del objetivo del proyecto; el coste es el factor fundamental para que la empresa constructora y el inversionista obtengan las utilidades esperadas y el proyecto no sufra de financiamientos, detenciones o enlentecimientos por



falta de flujos; mientras que el tiempo define la puesta en operación del proyecto y el inicio de la recuperación de la inversión, (Carcaño, et al., 2009). Más aún, (Duncan , 2000) reconoce que el éxito de un proyecto depende igualmente de administrar eficazmente otras seis áreas: la integración del proyecto, el alcance del proyecto, los recursos humanos, las comunicaciones, el riesgo y la procuración.

A pesar de que los proyectos de construcción representan una parte fundamental en el desarrollo de infraestructura, los incumplimientos con los tiempos de entrega suelen afectar a este tipo de proyectos, (Burgos & Ávila, 2015). La industria de la construcción suele estar sujeta a mayores riesgos e imprevistos que cualquier otra industria y aunque los proyectos de construcción requieren un planeamiento exhaustivo, la construcción se caracteriza por desarrollarse en circunstancias poco predecibles, tales como variaciones en las condiciones del suelo, la compleja predicción de la variaciones de precios y/u costes y un mercado con alta rotación de personal, que hacen difícil la correcta planificación, (Acharya, et al., 2006).

La falta de eficiencia en la gestión de proyectos de construcción, las demoras en entregas de los productos y los retrasos en obra es una de las problemáticas principales que afectan a estos proyectos, que como hemos visto, juegan un papel fundamental en el desarrollo de un país, (Kamara, et al., 2002) y (Egbu, et al., 2004). Es por ello que en el siguiente apartado se describirá de un modo más profundo el problema del retraso en los proyectos de construcción.

## 2.2 EL PROBLEMA DE LOS RETRASOS EN LOS PROYECTOS DE CONSTRUCCIÓN

En la literatura internacional no se tiene un consenso sobre la definición de los retrasos en construcción, pero a pesar de que existen ambigüedades, las definiciones suelen coincidir en aspectos fundamentales, (Peters, 2003).

(Stumpf, 2000) define el retraso como un acto o evento que origina una extensión de tiempo requerido para la culminación de una obra bajo contrato. Estos retrasos se reflejan en el cronograma como días adicionales de trabajo o

inicio tardío de otra actividad. Otros autores como (Elnagar & Yates, 1997), (Levy, et al., 2002) y (Lledó & Rivarola, 2007) mencionan que los retrasos son actos o eventos que posponen, extienden o de alguna manera alteran el cronograma. Los retrasos pueden ser el resultado de trabajos adicionales, trabajos suspendidos, retrasos causados por el contratista o de cualquiera otra causa bajo condiciones generales.

Más aún los retrasos se pueden definir como cualquier acto, omisión u otro evento que, de manera adversa, afecta o altera el cronograma, el progreso o la culminación de todo o parte del trabajo, (MICHSPEC, 1997), o como un estado de extensión en la duración de una actividad, o un estado de prevención de una actividad sobre su inicio o término respecto a su predecesor, (AACE, 2007). Un retraso puede definirse también como el tiempo adicional utilizado para finalizar las tareas más allá del tiempo especificado en el contrato o más allá del tiempo pactado entre las partes para la entrega del proyecto, (Assaf & Al-Hejji, 2006). Es la demora sobre el cronograma planeado y es considerado como uno de los mayores riesgos o problemas que este tipo de desarrollos deben afrontar, (Ogunlana & Promkuntong , 1996), (Aibinu & Jagboro , 2002), (Long, et al., 2004), (Koushki, et al., 2005) y (Jingsheg, et al., 2001).

Los retrasos en la ejecución de los proyectos pueden originar mayores costes, disputas entre partes, abandono del proyecto y hasta litigios legales, (Aibinu & Jagboro , 2002).

Sin importar la definición que se considere, la importancia de los retrasos recae en las causas que lo originan y los efectos que ocasiona en el cronograma de obra. Teniendo en cuenta esto y con el objeto de buscar un modo de prevenir la ocurrencia de los retrasos más frecuentes e importantes, en la siguiente sección se recopilarán las principales causas de retrasos en los proyectos de construcción reportadas en la literatura. Con este análisis de la literatura se busca poder conocer los principales factores que afectan a los proyectos de construcción.

## 2.3 CAUSAS DE RETRASO EN LOS PROYECTOS DE CONSTRUCCIÓN

### 2.3.1 ANTECEDENTES

Uno de los primeros estudios relacionados con las causas de retraso data del año 1985 y fue realizado por (Sullivan & Harris, 1985). Estos autores presentan un análisis de los principales factores que afectan a los proyectos de construcción de gran porte en Reino Unido. Se basan en una encuesta exploratoria realizada a 40 profesionales del sector de la construcción en las que se les solicitó que proporcionaran un índice del 1 al 100 según el porcentaje de ocurrencia de un listado de posibles causas de retraso. Como resultado se propone que las esperas por información, las variaciones de órdenes, problemas en el sitio, factores climáticos, complejidad en el diseño y trabajo con sub-contratos son las principales causas, aunque enumera otras 32 de menor frecuencia de ocurrencia.

Posteriormente, (Mansfield, et al., 1994) realizó un estudio en Nigeria. Este autor calcula el índice de severidad a partir de los resultados obtenidos mediante una encuesta. Se propusieron variados factores que pueden influir en los retrasos en proyectos de construcción y se pidió a los encuestados que determinaras si están (1) nada de acuerdo, (2) de acuerdo y (3) completamente de acuerdo con estos factores. Se ponderó este indicador con la cantidad de menciones para cada causa y de esta multiplicación se obtiene el índice de importancia propuesto por el autor. Como resultado se listan 16 causas de retrasos, entre las que se encuentran los problemas de financiamiento, la mala dirección de obra, el trabajo con sub-contratos, la falta de materiales, los cambios en las condiciones del sitio y las condiciones climáticas, entre otros de menor importancia.

En el mismo año (Ogunlana & Promkuntong, 1996) realizaron una encuesta focalizadas a 30 personas de 12 proyectos de construcción diferentes, pidiendo a los encuestados que indicaran la frecuencia de ocurrencia de los retrasos en una base del 1 al 100. Este estudio, dio como resultado un listado de 41 posibles causas de retrasos, destacándose: la espera de información, la compra de materiales, demoras en el diseño y mala dirección de obra.

Un año más tarde, (Odeyinka & Yusif, 1997) realizaron el primer estudio de causas de retrasos en proyectos de construcción de viviendas. El estudio se realizó a partir de dos sets de cuestionarios, un primer set de 150 encuestas dirigidas a conocer la percepción acerca de las causas de retraso en los proyectos de construcción y un segundo set, de 95 encuestas, destinado a conocer en profundidad los problemas relacionados con los costes de la construcción, los retrasos en los pagos, las fluctuaciones de costes y de duraciones y los costes que los retrasos implican en la construcción. Se obtuvo un índice como el promedio de cada respuesta de los encuestados (con valores que varían ente 0 a 9) y se determinaron como posibles causas de retrasos los cambios de sub-contratos, la demora en adjudicar los contratos, la demora en dar instrucciones, las huelgas y la mala planificación.

(Al-Momani, 2000) mencionó únicamente 7 causas principales de retrasos medidas a partir del conteo de la cantidad de indicaciones de SI/NO obtenidas mediante encuestas: (1) aspectos económicos, (2) aumento en el alcance de la obra, (3) cambios de proyecto durante la construcción, (4) condiciones generales del sitio, (5) diseño pobre, (6) errores constructivos y (7) tiempo y clima. Posteriormente (Odeh & Battaineh, 2002) realizaron un estudio de las principales causas de retrasos en proyectos tradicionales de construcción. Estos autores determinaron un índice relativo de importancia (I) según la Ecuación (1).

$$I = \frac{\sum_{i=1}^5 W_i \times X_i}{\sum_{i=1}^5 X_i} \quad (1)$$

dónde  $i$  es la respuesta obtenida al índice categórico (pudiendo ser un numero entero del 1 al 5 que va desde no acuerda, apenas acuerda, moderadamente acuerda, acuerda, acuerda completamente).  $W_i$  es el peso asignado al  $i$ -ésimo factor y  $X_i$  es la frecuencia dada como porcentaje de aparición del  $i$ -ésimo factor en función de todos los factores propuestos.

Tras un análisis de las 39 encuestas realizadas, los autores mencionaron 27 causas de retraso y destacaron entre ellas la baja productividad de la mano de obra, las condiciones del sitio inesperadas, la mala vinculación entre partes, la falta de trabajadores y la falta de experiencia del contratista, ente otras.

El primer estudio de causas de retraso de obras de construcción en USA encontrado data del 2003 y fue realizado por (Ahmed, et al., 2003). En este estudio se encontraron 38 causas principales de retrasos que fueron indexadas mediante un método de conteo de aparición. Entre los resultados destacan: el atraso tecnológico de la obra, el cambio de órdenes, los conflictos entre partes, los errores constructivos, la falta de comunicación entre partes el proceso financiero, entre otros. En el mismo año se desarrollaron dos estudios más fueron (Alwi & Hampson, 2003) y (Frimpong & Oluwoye, 2003).

(Alwi & Hampson, 2003) realizaron 112 encuestas a grandes y pequeñas empresas de construcción en Indonesia, proponiendo un índice de importancia  $Ip.I$  que se calcula mediante la Ecuación (2).

$$Ip.I = \frac{\sum_{i=1}^5 a_i \times x_i}{W \times 100} \quad (2)$$

dónde  $a_i$  es la constante que expresa el peso relativo de la  $i$ -ésima respuesta (con valores enteros del 1 al 5),  $x_i$  es el nivel de respuesta dado como porcentaje del total de respuestas para cada variable,  $i$  es la respuesta categórica del índice con un calor  $i = 1; 2; 3; 4$  ó  $5$  y  $W$  es el mayor de los pesos obtenidos para la variable de estudio.

Por otro lado (Frimpong & Oluwoye, 2003) propusieron un índice de importancia relativo (RIW) calculado mediante la Ecuación (3).

$$RIW = \frac{\sum_{i=1}^5 a_i \times n_i}{\sum_{j=1}^N x_j} \times 100 \quad (3)$$

dónde  $x_j$  es la suma de los  $j$  factores estudiados,  $j$  es el número de factores estudiados,  $j = 1 \dots N$ ,  $N$  es el número total de factores estudiados,  $a_i$  es una constante que expresa el peso relativo dado al  $i$ -ésimo factor (con valor  $a_5$  para una respuesta muy alta,  $a_4$  alta,  $a_3$  medio,  $a_2$  baja,  $a_1$  muy baja) y el factor  $n_i$  es la variable que expresa la frecuencia del  $i$ -ésimo factor ( $n_1$  frecuencia muy alta,  $n_2$  frecuencia alta,  $n_3$  frecuencia media,  $n_2$  frecuencia baja y  $n_1$  frecuencia muy baja).

Entre ambos autores se mencionan un total de 49 causas de retraso dentro de las que se distinguen las provenientes de la ejecución del proyecto de

construcción: calidad el material condiciones del suelo inesperadas, errores constructivos, falta de personal técnico, mal manejo del proyecto, mala distribución de la mano de obra. Cabe destacar que 4 de las 25 causas propuestas por (Frimpong & Oluwoye, 2003) se refieren a problemas financieros o de gestión administrativa de la obra.

Un año más tarde (Long, et al., 2004) realizaron un estudio sobre las causas de retrasos más frecuentes en proyectos de construcción en Vietnam, enumerando un listado de 16 y proponiendo ponderadores de importancia relativos para cada una de ellas. Entre las causas propuestas por estos autores se encuentran la burocracia, los cambios de órdenes, costes de ejecución mal estimados, errores constructivos y un equipo de proyecto incompetente.

Posteriormente, (Koushki, et al., 2005) realizaron una investigación sobre los factores que causan la entrega tardía en viviendas de Kuwait a partir de una encuesta a profesionales de 450 proyectos de construcción de viviendas privados y utilizando la frecuencia de repetición de una casusa como índice de estudio. Estos autores detectaron 7 causas transcendentales: (1) cambio de órdenes, (2) problemas con el contratista, (3) falta de experiencia del diseño, (4) falta de materiales constructivos, (5) falta de trabajadores, (6) problemas financieros, y (7) tiempo y clima.

El mismo año, dos estudios más fueron realizados por (Assaf & Al-Hejji, 2006) y (Zaneldin, 2006). (Assaf & Al-Hejji, 2006) realizó una encuesta a 66 involucrados del sector de la construcción, proponiendo un índice de importancia que se compone de un índice de frecuencia y de un índice de severidad. El índice de frecuencia (F.I) se utilizó para ordenar las causas de retraso en base a la frecuencia de ocurrencia que identifican los participantes y se calculó según la Ecuación (4).

$$F.I (%) = \sum a \times \frac{n}{N} \times \frac{100}{4} \quad (4)$$

dónde  $a$  es la constante que expresa el peso dado a cada respuesta (con rangos que van desde 1 a 4 expresados como números enteros para la frecuencia),  $n$  es la frecuencia de la respuesta y  $N$  es la cantidad de respuestas obtenidas.

Por otro lado, el índice de severidad (S.I) se utilizó para determinar el grado de importancia o severidad que los participantes de la encuesta le dan a la causa estudiada, Ecuación (5).

$$S.I (\%) = \sum b \times \frac{n}{N} \times \frac{100}{4} \quad (5)$$

dónde  $b$  es la constante que expresa el peso dado a cada respuesta (con rangos que van desde 1 a 4 expresados como números enteros para la severidad),  $n$  es la frecuencia de la respuesta y  $N$  es la cantidad de respuestas obtenidas.

Finalmente, el índice de importancia (IMP.I) se obtuvo según la Ecuación (6).

$$IMP.I(\%) = \frac{[F.I(\%) \times S.I(\%)]}{100} \quad (6)$$

(Assaf & Al-Hejji, 2006) realizaron uno de los estudios más completos enumerando 54 causas de retrasos de proyectos de construcción y pudiéndose distinguir entre ellas los problemas de definición de plazo, la necesidad de materiales o maquinarias especiales y el problema del personal cualificado.

Por otro lado, el estudio realizado por (Zaneldin, 2006) propuso un índice de importancia ponderado (WA), que se obtuvo a través de una encuesta y que se calcula mediante la Ecuación (7).

$$WA = \sum \frac{W_i \times x_i}{N} \quad (7)$$

dónde  $W_i$  es el peso asignado a la  $i$ -ésima variable estudiada,  $x_i$  es el número de encuestados que seleccionaron la variable  $i$  como opción de causa de retraso de proyectos de construcción y  $N$  es el número total de respondientes de la encuesta realizada, en el caso de este autor 71. El estudio tiene como resultado un listado de 23 causas principales de retrasos como: aumento de precios, el aumento del alcance, los cambios de especificaciones y los errores de diseño como algunas de las principales causas que llevaron a los proyectos de construcción de Emiratos Árabes Unidos estudiados a tener demoras en sus entregas.

En el 2007, tres artículos fueron publicados, dos de ellos en Malasia (Alaghbari, et al., 2007) y (Sambasivan & Wen-Soon, 2007) el otro en Portugal, (Moura, et al., 2007).

Por un lado, (Alaghbari, et al., 2007) en su estudio realizado en Malasia, utilizó un índice para el ranking de las causas de retraso basado en el indicador MS, Ecuación (8).

$$MS = \left( 4 - \frac{\sum(f \times s)}{N} \right) \quad (8)$$

dónde  $MS$  es el puntaje obtenido,  $f$  es la frecuencia de las respuestas entre 1 y 4,  $s$  es el puntaje dado a cada factor, también ente 1 a 4 y  $N$  es el número total de respuestas. Este autor propone 28 causas dentro de las que se encuentran la ausencia de personal consultor en el sitio, la baja productividad de la mano de obra, los cambios de proyecto durante la ejecución y las condiciones económicas, entre otros.

También en Malasia, (Sambasivan & Wen-Soon, 2007) utilizó un índice de importancia relativa RII para determinar cuáles de las causas de retraso a partir de sus trabajos de campo mediante encuestas, Ecuación (9).

$$RII = \frac{\sum W}{A \times N} \quad (9)$$

dónde  $W$  es el peso dado a cada factor por los encuestados (con valores del 1 al 5),  $A$  es el valor más alto que los respondientes han dado y  $N$  es el número total de encuestados. Como resultado los autores propusieron 27 causas de retrasos en los proyectos de construcción entre las que se encuentran los cambios de sub-contratos, la demora en liberar el sitio, las disputas y negociaciones o la falta de comunicación entre las partes. Por otro lado, (Moura, et al., 2007) enumeró 12 causas, de las que se puede destacar las especificaciones poco claras, errores en el diseño, problemas con el gerente del proyecto y problemas de organización del contratista.

(El Razek, et al., 2008) publicó un estudio sobre las causas de retrasos en proyectos de construcción egipcios, utilizando un índice de importancia para cada causa de retraso ( $I$ ) que se calcula como se expresa en la Ecuación (10).

$$I = \sum_{i=1}^n \frac{a_i \times x_i}{3} \quad (10)$$

dónde  $I$  es el índice de importancia de la causa de retraso,  $a_i$  es el peso de la  $i$ -ésima respuesta,  $x_i$  es la frecuencia de la  $i$ -ésima respuesta e  $i$  es el índice de



respuesta categorizado, en dónde una respuesta “muy importante” tiene un valor de 3, una respuesta “importante” tiene un valor de 2 y una respuesta “poco importante” tiene un valor de 1 y una respuesta “no importante” tiene un valor de cero.

Como resultado el autor mostró un listado de 28 causas con ponderadores de importancia. Se destacan como algunas de las principales causas la falta de trabajadores, la lentitud en la toma de decisiones, la mala planificación, y la falta de una base de datos para estimar la duración y los recursos, ente otras.

En el mismo año (Le-Hoai, et al., 2008) utilizó un método similar al de (Assaf & Al-Hejji, 2006), calculando el índice de importancia IMP.I en base a un índice de frecuencia (F.I) y uno de severidad (S.I), Ecuación (11), Ecuación (12) y Ecuación (13).

$$F.I = \frac{\sum_0^4 a_i \times n_i}{4N} \quad (11)$$

$$S.I = \frac{\sum_0^4 b_i \times n_i}{4N} \quad (12)$$

$$IMP.I = F.I \times S.I \quad (13)$$

dónde  $a$  es la constante que expresa el peso dado a cada respuesta en la encuesta (con rangos que van desde 1 a 4 expresados como números enteros para la frecuencia),  $b$  es la constante que expresa el peso dado a cada respuesta (con rangos que van desde 1 a 4 expresados como números enteros para la severidad),  $n$  es la frecuencia de la respuesta y  $N$  es la cantidad de respuestas obtenidas. Este autor destacó como principales causas de retrasos la falta de comunicación, el mal manejo del sitio, la ocurrencia de accidentes, problemas con los subcontratos y errores de diseño.

(Sweis, et al., 2008) informó de 30 causas de retrasos tomando en cuenta el promedio de puntaje que cada encuestado le asignó a la causa estudiada, proponiendo como causas destacables, la demora en obtener permisos, un quipo consultor mal cualificado, errores de diseño, demora al adjudicar el contrato y demora en la llegada de materiales, entre otros.

En 2009, tres artículos fueron publicados, (Al-Hadi Tumi, et al., 2009), (Kaliba, et al., 2009) y (Al-Kharashi & Skitmore, 2009). Por un lado, (Al-Hadi Tumi, et al., 2009) mediante un cuestionario realizado a proyectos de construcción en Libia obtuvo 35 causas principales de retrasos entre las que se pueden destacar los errores constructivos, la demora en despejar el sitio, la demora en la llegada de materiales y los errores y discrepancias en el contrato.

Por otro lado, (Kaliba, et al., 2009) realizó un estudio similar en Zambia, que al igual que sus predecesores, se basó en una encuesta a interesados del área de la construcción. Este autor computó el índice de importancia utilizando el indicador  $WA$  de la Ecuación (14).

$$WA = \frac{1}{4} \times \frac{\sum_1^4 F_i \times R_i}{\sum_1^4 F_i} \times 100\% \quad (14)$$

en dónde  $WA$  es el promedio ponderado del peso percibido por los encuestados,  $R_i$  es la respuesta tipo en la escala de (Likert, 1931),  $i$  es el rango entre 1 a 4 de la mencionada escala y  $F_i$  es la frecuencia o el número total de encuestados que eligieron la variable. De este estudio resultaron 12 causas como ser las condiciones económicas, huelgas, inspecciones y validaciones y mala coordinación en el sitio, entre otras.

Finalmente, (Al-Kharashi & Skitmore, 2009) realizó un estudio en proyectos públicos de Arabia Saudita encontrando 69 causas principales, de las que cabe señalar aumentos de gastos, baja productividad, alcance poco claro o aumento del alcance, conflictos entre partes, cambios del personal o cambios de órdenes, entre otras. Posteriormente, (Abdullah, et al., 2010) presentó un listado de 18 causas como ser la escalada de precios, la falta de experiencia del contratista, la falta de trabajadores o las condiciones de suelo inesperadas, entre otras.

El mismo año (Chileshe & Danso, 2010) realizaron el primer estudio de causas de retrasos específicamente en proyectos de construcción carreteros utilizando un índice de importancia relativa  $IIR$  que se define en la Ecuación (15).

$$IIR = \frac{\sum_{i=1}^{i=A} n_i \times i}{A \times N} \quad (15)$$

en dónde  $n_i$  define el número de encuestados que han dado un valor de importancia al factor  $i$  en cuestión,  $A$  determina la importancia de cada factor con valores entre 1 al 5 y  $N$  es el número total de encuestados en el estudio. Como resultado, éstos autores enumeraron 14 causas de retrasos de este tipo de proyectos, dentro de las que se encuentran el tiempo y clima, la baja oferta, la pobre base de datos para estimar duraciones, los excesivos controles de calidad y la baja productividad de la mano de obra, ente otros.

En similares fechas, (Fugar & Adwoa, 2010) realizaron un estudio de causas de retrasos en Ghana, proponiendo un índice de importancia RII que se mide según la Ecuación (16).

$$RII = \frac{\sum P_i \times U_i}{N \times n} \quad (16)$$

en dónde,  $RII$  queda definido como el índice de importancia relativo,  $P_i$  el valor dado a la causa de retraso por el encuestado,  $U_i$  es el número de encuestados que han proporcionado idénticos pesos a la causa estudiada,  $N$  es el número de la muestra y  $n$  es el valor más alto obtenido para la causa de retraso estudiada. Como resultado se obtuvo un listado de 29 causas de retrasos entre las que se encuentran: la ausencia de algún mecanismo para no repetir errores, las condiciones de suelo inesperadas, la demora en llegar materiales, la demora en obtener permisos, la falta de trabajadores y disputas legales entre otras más.

Un año más tarde, (Afshari, et al., 2011), también utilizando un método de encuesta, determina el grado de acuerdo entre el panel de expertos con respecto a las causas de retraso consultadas ( $W$ ) utilizando la Ecuación (17) y Ecuación (18).

$$W = \frac{120U - 3n \times (n-1)^2 \times m^2}{n \times (n-1)^2 \times m^2} \quad (17)$$

$$U = \sum_{j=1}^n (\sum_{i=1}^m R_{ij})^2 \quad (18)$$

en dónde  $n$  es el número de causas de retraso de proyectos de construcción no excusables,  $m$  es el número de encuestados en la tercer ronda del panel de expertos,  $R_{ij}$  es el grado de significancia determinado para la  $j$ -ésima causa

proporcionado por el  $i$ -ésimo experto. Es así que como resultado se enumeran 19 causas como son el conflicto entre partes, errores de diseño, falta de comunicación o cambio de órdenes.

En el 2012, cuatro autores investigaron sobre el mismo tema. Por un lado, (Challal & Tkiouat, 2012) realizaron un análisis con proyectos de África detectando 9 causas y destacando sobretodo la falta de comunicación y coordinación entre partes como uno de los principales causantes de los retrasos en estos proyectos.

(Kazaz, et al., 2012) realizó un estudio exploratorio en Turquía donde preguntó acerca de 34 factores a 149 empresas constructoras, utilizando un Índice de importancia  $I$  para realizar la comparativa que se expresa en la Ecuación (19).

$$I = \frac{\sum_{i=1}^5 a_i \times x_i}{\sum_{i=1}^N x_i} \quad (19)$$

en dónde  $I$  muestra la importancia relativa del factor e  $i$  indica la categoría del factor en una escala del 1 al 5,  $a_i$  representa el valor numérico de la respuesta entre 0 a 4 y  $x_i$  también del 0 al 4 denota la frecuencia. Es así que (Kazaz, et al., 2012) listó y ordenó mediante este ponderador de importancia 28 causas destacando las disputas y negociaciones, la baja productividad de la mano de obra, los cambios de especificaciones, la burocracia o la dificultad de almacenamiento del material.

(Kikwasi, 2012) propuso la utilización del índice de importancia de (Sambasivan & Wen-Soon, 2007) (Ecuación (8)) y menciona 20 causas de retraso diferentes resaltando como principales la falta de materiales constructivos, la interferencia del gobierno, la mala programación o los controles de calidad, ente otras más. Finalmente, (Mohammed & Danladi, 2012) publicó una tabla con 34 causas dentro de las que se destacan aspectos religiosos, errores de diseño, influencia política, equipo ineficiente, falta de comunicación y realización de trabajos de emergencia, entre otras.

Un año más tarde, (Akogbe, et al., 2013) estudió las causas de retraso utilizando los mismos índices propuesto por (Le-Hoai, et al., 2008) y listó 30

causas de retrasos de proyectos de construcción, tales como demora en adjudicar el contrato, aumento del precio del material, lentitud en la toma de decisiones, errores constructivos o cambios de proyecto durante la ejecución, entre otras.

(Gündüz, et al., 2013) realizó un estudio exploratorio en Turquía proponiendo 67 causas y sus ponderadores de importancia. Dentro de su listado vale la pena mencionar cambios de materiales durante la construcción, cambios de proyecto durante la construcción, ausentismo de los trabajadores, baja productividad de la mano de obra, cambio de órdenes, conflictos entre partes y problemas financieros, entre varias más. En lo que respecta al ponderador de importancia, el mismo fue obtenido luego de una encuesta realizada a 64 personas que analiza 83 posibles factores que afectan a los proyectos de construcción. Estos autores utilizaron para su clasificación un índice de importancia relativa (RII = Relative Importance Index) calculado según la Ecuación (20).

$$RII = \frac{\sum w}{(A \times N)} \quad (20)$$

dónde W es el peso relativo que le dio cada uno de los encuestados al factor correspondiente (que es un número entero del 1 al 5), A es el peso más alto obtenido en la encuesta para la causa y N es el número total de encuestados. El índice RII tiene un valor entre 0 a 1, en donde el cero no es inclusivo y cuanto más alto es el valor del índice RII más alta resulta la correlación entre el factor encuestado y el retraso de los proyectos de construcción. (Sweis, 2013) recopiló 30 causas de retrasos más, dentro de las que hay que destacar la mala planificación, la mala supervisión, las interferencias del dueño, los errores constructivos o la falta de trabajadores, entre otras.

(Marzouk & El-Rasas, 2014) utilizando el mismo índice que recaba la frecuencia y la severidad utilizado por (Le-Hoai, et al., 2008) y (Akogbe, et al., 2013) presentaron 10 causas de retrasos dentro de las que se deben mirar la baja productividad de la mano de obra, las condiciones superficiales, la forma de licitación y la mano de obra no calificada, entre otras.

En el 2015 (Gluszak & Lesniak, 2015) propusieron la utilización del promedio  $S_i$  de los resultados encontrados en la encuesta según la Ecuación (21).

$$S_i = \frac{\sum_{j=1}^{N_i} a_{ij}}{N_i} \quad (21)$$

donde  $S_i$  es el promedio del  $i$ -ésimo factor estudiado que puede causar el retraso,  $N_i$  es el número total de respuestas para el  $i$ -ésimo factor y  $a_{ij}$  es el grado asignado por el entrevistado al  $i$ -ésimo factor para la respuesta  $j$ -ésima. Con los resultados, los autores proponen un análisis multivalente para determinar las causas más enumeradas, resultando ser las demoras en obtener permisos, los métodos constructivos no apropiados, los problemas financieros y la mala programación.

(Mukuka , et al., 2015) realizaron un estudio exploratorio en Sudáfrica, logrando identificar 49 diferentes causas de retrasos en los proyectos de construcción. Vale la pena mencionar la falta de materiales, la mala actitud de los trabajadores, la maquinaria ineficiente, las fluctuaciones en los costes o la falta de trabajadores como una de las tantas causas principales detectadas en este estudio. Finalmente (Sepasgozar, et al., 2015), utilizando el índice de importancia basado en frecuencia y severidad que propusieron (Le-Hoai, et al., 2008), (Akogbe, et al., 2013) y (Marzouk & El-Rasas, 2014) estudiaron proyectos de construcción para inmigrantes y clases sociales sumergidas, proponiendo 8 causas principales: (1) cambios de órdenes, (2) problemas con el consultor, (3) demoras en atender pedidos del contratista, (4) problemas con el dueño, (5) factores externos al proyecto, (6) falta de materiales constructivos, (7) falta de trabajadores y (8) problemas con el proyecto o el diseño.

En el 2016 (Al Hammadi & Nawab, 2016) presentaron 14 causas de retraso dentro de las que hay que señalar la falta de cooperación del dueño, los cambios de órdenes, las duraciones de contrato no realistas, la lentitud en la toma de decisiones o los cambios del proyecto durante la construcción, entre otras. El mismo año (Awari, et al., 2016), utilizando el mismo índice que (Gündüz, et al., 2013), Ecuación (19), informó sobre 45 causas de retrasos diferentes dentro de las que vale la pena señalar la corrupción, la demora en liberar el sitio, el atraso

tecnológico, la baja productividad de la mano de obra, el desabastecimiento de la zona o los errores de dirección entre otras más.

(Bangash, 2016) realizó un estudio desde el punto de vista del constructor y enumeró 15 posibles causas de retraso en los proyectos de construcción, dentro de las que se encuentran los cambios durante el proyecto, las demoras en la producción de documentos, los controles de calidad o los conflictos entre las partes. (Anees & Sabarinathan, 2016) mencionan un listado de 46 causas principales de retrasos en los proyectos de construcción, destacando el cambio de órdenes, la baja productividad, el ausentismo o el aumento de alcance, entre otras más.

(Bagaya & Song, 2016) presentó un estudio empírico de las causas de retrasos en proyectos de construcción pública, deduciendo que las principales son: la falta de planeamiento, los problemas financieros y las disputas contractuales. Por otro lado (Shirowzhan, et al., 2016) presenta un estudio de causas de retrasos en áreas portuarias, detectando que el diseño y el pobre control son los principales factores. Finalmente (Shaar, et al., 2016) realizó un trabajo en el que se estudia la interface entre el diseño y la construcción, proponiendo que el pobre planeamiento es una de las principales causas que producen los retrasos.

En el 2017 dos estudios fueron sido realizados, uno en Jordán (Al-Hazim, et al., 2017) y otro en Zimbabue, (Nyoni & Bonga, 2017). (Al-Hazim, et al., 2017) propone en su estudio un listado de 18 causas con sus ponderadores de importancia, dentro de las que menciona como principales la falta de trabajadores, los errores de diseño, los cambios de órdenes o la calidad del material, entre otras. (Nyoni & Bonga, 2017) utilizando el índice de importancia que se muestra en la Ecuación (22), listan 42 causas ordenadas por importancia, destacándose la mala supervisión, las inspecciones, la lentitud en la toma de decisiones o las leyes gubernamentales como las principales de ellas.

$$RII(\%) = \left[ \frac{(5n_5 + 4n_4 + 3n_3 + 2n_2 + n_1)}{5(n_5 + n_4 + n_3 + n_2 + n_1)} \right] \times 100\% \quad (22)$$

### 2.3.2 ANÁLISIS DE LA LITERATURA

Con el objetivo de poder analizar y comparar apropiadamente las causas de retraso observados a lo largo de la revisión bibliográfica realizada y lograr una mejor comprensión de los resultados, las causas de retraso fueron clasificadas en 8 familias: “Aspectos Administrativos”; “Ejecución”; “Proyecto/Diseño”; “Mano de obra”; “Maquinaria”; “Materiales”; “Clima”; “Otros”.

La familia “Aspectos Administrativos” abarca las tres etapas de la vida de un proyecto de construcción y se refiere a los temas administrativos y financieros y/o todas las actividades requeridas para llevar adelante un proyecto, incluyendo la firma del contrato, problemas económicos y financieros y/o burocracias y tramitaciones.

La familia “Diseño” incluye todas las causas de retraso de proyectos de construcción que se mencionan en la literatura relacionadas con los estudios previos, estudios de campo, cálculos estructurales y redacción y/o ejecución de documentos y planos.

La familia “Ejecución” es una de las más complejas y reúne las causas relacionadas a imprevistos que se dan durante la ejecución de obra; incluye cambios durante la construcción, errores constructivos, falta de comunicación, mala dirección de obra y/o problemas con la seguridad o accidentes, entre otros.

La familia “Mano de obra” se refiere a todas las causas de retraso atribuibles al personal, desde personal altamente calificado hasta ayudantes o peones. Análogamente, la familia “Maquinaria” se refiere a las causas de retraso atribuibles al desempeño de la maquinaria, la calidad o el mal manejo de la misma. La familia “Materiales”, como su nombre lo indica, refiere a las causas de retraso ocasionadas por problemas con los materiales, ya sea por la distribución, acopio o calidad de los mismos.

La familia “Clima” reúne las causas asignables a problemas con las inclemencias del tiempo, atrasos por lluvias y/o eventos naturales. Finalmente, la familia “Otros” agrupa las causas de retraso no especificadas o identificadas por los autores.



Cada una de las causas enumeradas por los autores en la revisión bibliográfica efectuada fue clasificada en una de las siguientes 8 familias anteriores. La clasificación aquí propuesta puede verse en el Anexo A.

Asimismo, el número de veces que ésta familia es mencionada por cada uno de los autores fue computado. Es decir, que, si un autor menciona 4 causas dentro de la familia “Ejecución”, para el autor se contabilizará 4 menciones en ésta familia. De este modo se obtiene un sistema de medición de la importancia relativa de una causa de retraso. Este resumen se muestra en la Tabla 1. Los resultados aquí mostrados servirán para realizar un análisis de la literatura existente, pero además sirven como guía para conocer la globalidad de los resultados, es decir, en cuáles familias se producen mayores números de menciones de causas de retraso de los proyectos de construcción.

Las 1181 causas enumeradas por los 47 autores que realizan análisis cuantitativos conforman una base de datos de la literatura que será analizada mediante estadística básica. La Figura 2 muestra la cantidad de artículos en forma porcentual distribuidos por los diferentes continentes.

Desde el punto de vista del contenido de los artículos estudiados, se puede concluir que la mayoría de los autores estudian las causas del retraso de los proyectos de construcción de manera individual, por lo que los resultados son dependientes de las regiones en dónde se realizaron los estudios o las tipologías de las construcciones que los autores relevaron. Esta situación no permite conocer cuáles son las principales causas de retraso en proyectos de construcción de un modo global, porque no existe un criterio unificado para identificarlas.

2. Estado del Arte

Tabla 1, Resumen de la revisión de la literatura - causas de retraso de proyectos de construcción.

AUTOR	PAÍS	FAMILIA NIVEL I							
		Ejecución	Aspectos Adm.	Proyecto Diseño	Mano de obra	Maquinaria	Materiales	Clima	Otros
(Abdullah, et al., 2010)	Malasia	7	3	3	4		1		
(Acharya, et al., 2006)	Korea	11	2	6	7	1		1	
(Afshari, et al., 2011)	Iran	10	2	3	2	1	1		
(Ahmed, et al., 2003)	EE.UU.	16	6	5	5	1	2	2	
(Aibinu & Jagboro, 2002)	Nigeria	12	4		3	1	2		
(Akogbe, et al., 2013)	Benín	15	6	3	2	1	2	1	
(Al Hammadi & Nawab, 2016)	Arabia Saudita	6	2	2	2		2		
(Alaghbari, et al., 2007)	Malasia	9	5	2	7	1	3	1	
(Al-Hadi Tumi, et al., 2009)	Libia	14	7	5	5		3	1	
(Al-Hazim, et al., 2017)	Jordania	5	2	4	2	1	3	1	
(Al-Kharashi & Skitmore, 2009)	Arabia Saudita	21	9	9	16	4	9		
(Al-Momani, 2000)	Jordania	2	1	3				1	
(Alwi & Hampson, 2003)	Indonesia	8	1	3	4	3	4	1	
(Anees & Sabarinathan, 2016)	India	14	2	10	10	4	6		
(Assaf & Al-Hejji, 2006)	Arabia Saudita	13	5	13	13	3	6	1	
(Awari, et al., 2016)	India	15	6	7	7	4	3	2	
(Bagaya & Song, 2016)	Burkina Faso	3	2	4				1	
(Bangash, 2016)	Pakistán	8		6	2		1		
(Challal & Tkiouat, 2012)	Marruecos	4	1	3	1				
(Chileshe & Danso, 2010)	Ghana	3	2	4	4			1	
(El Razeq, et al., 2008)	Egipto	8	4	4	5	2	4	1	
(Frimpong & Oluwoye, 2003)	Ghana	7	5	4	2	1	5	1	
(Fugar & Adwoa, 2010)	Ghana	10	5	6	4	1	2	1	
(Gluszek & Lesniak, 2015)	Polonia	2	2	2	2	1		1	
(Gündüz, et al., 2013)	Turquía	17	6	14	16	4	8	2	
(Kaliba, et al., 2009)	Zambia	4	4		2	1	1		
(Kazaz, et al., 2012)	Turquía	7	4	4	6	1	5	1	
(Kikwasi, 2012)	Tanzania	5	4	3	4	1	2	1	
(Koushki, et al., 2005)	Kuwait	1	1		3		1	1	
(Le-Hoi, et al., 2008)	Vietnam	9	5	3	1		1	1	
(Long, et al., 2004)	Vietnam	4	3	5	3	1			
(Mansfield, et al., 1994)	Nigeria	5	5	2	1		2	1	
(Marzouk & El-Rasas, 2014)	Egipto	2	3	2	2		1		
(Mohammed & Danladi, 2012)	Nigeria	14	7	5	4		3	1	
(Moura, et al., 2007)	Portugal	1	2	2	4	1	1		2
(Mukuka, et al., 2015)	Sudáfrica	14	6	7	7	3	10	2	
(Nyoni & Bonga, 2017)	Zimbabue	9	7	11	8	1	5	1	
(Odeh & Battaineh, 2002)	Jordania	10	3	3	7	1	2	2	
(Odeyinka & Yusuf, 1997)	Nigeria	7	2	2	1		1	2	
(Ogunlana & Promkuntong, 1996)	Tailandia	5	3	3	5	3	4		
(Sambasivan & Wen-Soon, 2007)	Malasia	10	3	3	6	1	2	1	
(Sepasgozar, et al., 2015)	Irán	2		1	3		1		1
(Shaar, et al., 2016)	Palestina	2	2	2	2	1		1	
(Sullivan & Harris, 1985)	Reino Unido	5	2	3	3	1	2	1	
(Sweis, 2013)	Jordania	10	4	4	5	2	4	1	
(Sweis, et al., 2008)	Jordania	13	5	2	5	3	3	1	
(Zaneldin, 2006)	Emos Arabes	9	5	5	4		1		

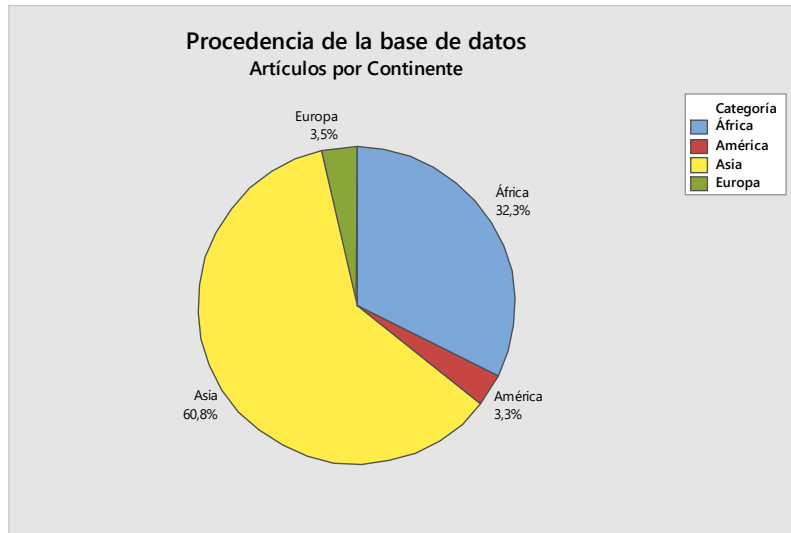


Figura 2. Análisis porcentual de la literatura referente a causas de retraso en proyectos de construcción

Más aún, durante el estudio de la literatura, se ha procesado los índices de importancia relativa que cada autor le da a las causas propuestas en sus estudios. Para hacer comparables los índices propuestos por los autores es necesario realizar una estandarización bajo una única escala. En esta tesis se ha propuesto una forma de estandarización para la cual se siguieron los siguientes pasos:

(1) Para cada uno de los autores de la literatura que proponen un listado de causas de retraso de proyectos de construcción con índices de ponderación de importancia, se suma la totalidad de los índices propuestos.

(2) El valor de la suma de todos los índices de importancia equivale en una escala del 0 a 100 al valor 100.

(3) Todos los valores propuestos son transformados tomando en cuenta una relación de linealidad.

Es así que, a modo de ejemplo, (Akogbe, et al., 2013) menciona 31 causas de retraso en proyectos de construcción con factores de impacto que varían entre 0.260 y 0.679. Todos los factores de impacto de las 31 causas propuestas por (Akogbe, et al., 2013) se han sumado totalizando un valor de 14,839. Este valor

será igual al 100% y cada valor individual se calcula linealmente. Por ejemplo, la causa “capacidad financiera”, que tiene un factor de impacto de 0,679 en la escala de los autores será equivalente al 4,58% del total de las causas enumeradas de acuerdo a la escala estandarizada aquí propuesta.

De este modo se han transformado la totalidad de los índices de importancia a índices de importancia estandarizados permitiendo hacer comparables las propuestas de los diferentes autores debido a que es posible leerlo bajo la misma escala.

Además del método de medición de importancia a través de los índices estandarizados, para cada grupo y subgrupo, se hizo un seguimiento del número de veces que se mencionó una causa, Tabla 1. Esto conduce a que una vez realizado todo el estudio bibliográfico y su análisis posterior, se tienen dos sistemas de medición diferentes: uno basado en el índice de impacto relativo estandarizado asignado por los autores y otro basado en los recuentos de mención Anexo 1.

Con los índices de importancia estandarizados, expresados en el Anexo A, se ha construido una gráfica, Figura 3. En este gráfico se puede ver que existe una gran variabilidad de los datos de la literatura. Existen causas a las que se les ha asignado casi un 25% de importancia relativa, mientras muchas otras de ellas no llegan a completar el 1%.

Por ejemplo, para la causa “Baja productividad de la mano de obra”, (Marzouk & El-Rasas, 2014) propone un índice estandarizado de importancia de 10,3; mientras que (Al-Kharashi & Skitmore, 2009) y (Gündüz, et al., 2013) proponen 1,3 y 1,0 respectivamente. Otro ejemplo se puede ver claramente en la causa de retraso “falta de comunicación entre partes”, mencionada por 28 autores diferentes y a la que por ejemplo, (Challal & Tkiouat, 2012) le ha asignado un valor estandarizado de 14,7 mientras que (Ahmed, et al., 2003) propone 1,7.

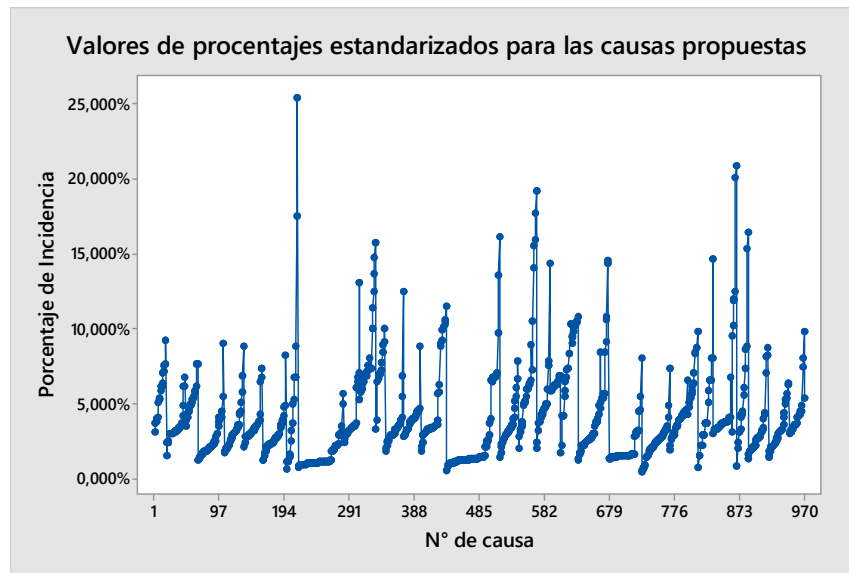


Figura 3, Gráfica para los índices de importancia estandarizados de las causas de retraso de proyectos de construcción.

Cuando se estudia la variabilidad de estos índices de importancia relativa estandarizados, se puede decir que estadísticamente no es posible definir que existe una familia de causas principales de retraso de mayor importancia que otra. Esta variabilidad en los índices de importancia, que puede venir provocada por el uso de escalas diferentes o por la cantidad de causas que un autor enumera, hace imposible deducir una causa principal o familias de causas principales de retrasos.

Por ejemplo, (Koushki, et al., 2005) menciona únicamente 7 causas de retraso, lo que, en su índice de importancia estandarizado, produce que la causa “Cambio de órdenes” tenga un índice de importancia relativo de 19,13, seguido por “problemas financieros” con 17,7, “falta de experiencia del dueño” con 15,8, “falta de materiales constructivos” con 15,5, “tiempo y clima” con 14,1, “falta de trabajadores” con 10,5 y finalmente “problemas con el contratista” con 7,2. Mientras tanto (Al-Kharashi & Skitmore, 2009) menciona 68 causas diferentes

produciendo que en su sistema estandarizado de importancia la causa con menor importancia se le haya asignado 0,8 y a la más importante 5,7.

La variabilidad en los índices de importancia relativos detectada dificulta la realización de un análisis comparativo con rigor estadístico que permita determinar si existen causas de retraso en proyectos de construcción comunes entre los estudios encontrados en la literatura.

A la diversidad de regiones y tipologías constructivas de los estudios y la variabilidad de los índices de importancia propuestos, se suma que los estudios relevados en la literatura se basan en su mayoría en la realización de encuestas, entrevistas estructuradas, entrevistas semi-estructuradas o paneles con expertos con el fin de determinar las causas de retraso para las situaciones planeadas. Pero ninguno de los estudios encontrados revela las causas de retraso desde un punto de vista práctico, con datos certeros de la realidad de los proyectos de construcción, sino más bien que se basan en la opinión de expertos en el tema. Es por ello que la variabilidad no solo puede depender de la locación o tipología constructiva o del sistema de medición, sino que puede provenir del tipo de estudios en los que se basa la literatura actual.

Corrientes de pensamiento como la “Gestión en base a Evidencias”, tratan el problema de encontrar evidencias o causas raíces que expliquen la variabilidad en los datos que se analizan. Uno de los principales resultados que se han encontrado en estas investigaciones es que en industrias en la que se requiere recurrir a expertos para determinar en base a opiniones causas raíces, es inevitable que los factores a determinar se vean influenciados por criterios, experiencias de vida, organizaciones o locaciones donde han sido realizado los estudios cuantitativos, (Pfeffer & Sutton, 2006). En estos casos, separar la “verdad” del “ruido” obtenido por los criterios subjetivos suele ser un gran reto.

Del análisis realizado se puede concluir entonces que los índices propuestos por los autores no proporcionan confiabilidad estadística para determinar las principales causas de retraso. Es por ello que mayores estudios deberán ser llevados a delante para poder determinar con un nivel de confiabilidad aceptable las principales causas de retraso en los proyectos de construcción. Determinarlas

permitirá avanzar en la propuesta de herramientas de mejora que permitan la reducción de los retrasos de los proyectos de construcción.

## 2.4 CONCLUSIONES

Se han recopilado 1181 causas de retrasos de proyectos de construcción enumeradas por 47 autores diferentes que realizan análisis cuantitativos. Estas causas han conformado una base de datos que fue analizada estadísticamente. La base de datos de la literatura muestra una fuerte tendencia al estudio de estas problemáticas en continentes como Asia y África (más del 80% de los estudios fueron realizados entre ambos continentes). Este resultado remarca la necesidad de ampliar los horizontes de estudio en Europa y USA.

Asimismo, ha sido demostrada mediante estudios estadísticos la variabilidad de los datos relativos a la importancia que los autores dan a las causas de retrasos. Las posibles causas de esta variabilidad vienen dadas por:

1. El hecho de que las causas son denominadas de maneras diferentes por los autores, lo que dificulta el emparejamiento de las mismas.
2. El hecho de que los autores mencionan como principales un número de causas diferentes, por lo que los índices de importancia relativa estandarizados varían dependiendo de las cantidades de causas que se hayan considerado en cada estudio.
3. El hecho de que los estudios cuantitativos de la literatura que han sido tenidos en cuenta para la investigación están realizados a partir de entrevistas, entrevistas semi-estructuradas o paneles de expertos. Las experiencias, vivencias o criterios personales suelen tener un papel preponderante en la variabilidad de los datos que se obtienen.

Esta variabilidad hace imposible deducir una causa principal o familias de causas principales de retrasos, evidenciándose la necesidad de llevar a cabo un estudio más profundo dentro de las familias enumeradas, buscando nuevos de análisis para determinar familias o causas principales.

Teniendo en cuenta todo lo anteriormente mencionado, se concluye que las deficiencias de la literatura se basan en dos puntos clave:

1. Debido a la variabilidad de los datos encontrados en la literatura y considerando las metodologías que han sido estudiadas hasta el momento, se hace imposible determinar cuáles son las causas de retraso de proyectos de construcción de mayor importancia. Los estudios encontrados hacen inviable un estudio en un contexto globalizado que permita definir con rigor estadístico la causa o causas más importantes que producen retrasos.
2. Además del problema de variabilidad de datos, se ha determinado que la literatura existente se basa únicamente en estudios de opinión, pero sin validaciones certeras con datos reales de proyectos de construcción. Existe una falta de información basada en resultados del comportamiento real de los proyectos que ayude a buscar soluciones de prevención o de reducción de retrasos.

En consecuencia, el proyecto de investigación que aquí se propone tiene un doble objetivo. Por un lado, la clasificación y estandarización de todas las causas de retraso de proyectos de construcción encontradas en la literatura bajo una conceptualización común y de una manera global.

Y, por otro lado, se buscará recopilar datos de proyectos de construcción reales, con el fin de desarrollar herramientas para la predicción del comportamiento de los proyectos de construcción que permitan buscar soluciones preventivas con el objetivo final de reducir los retrasos en obra.



## 3. OBJETIVOS Y PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN

---

### 3.1 OBJETIVOS DE INVESTIGACIÓN

Desde una perspectiva amplia, el problema que motiva esta investigación es mejorar los tiempos de entrega de los proyectos de construcción a través de la disminución de los retrasos en obra.

Basados en los resultados de la revisión de la literatura y de los análisis llevados a cabo se propone la siguiente declaración:

No es posible deducir a partir de los estudios existentes la o las causas principales de retraso de los proyectos de construcción, por lo que mayores estudios en este tema son necesarios.

Para abordar esta afirmación se estudiarán las principales causas de retraso, se determinarán las principales y se propondrán herramientas de mejora para abordar las problemáticas detectadas. Teniendo en cuenta esto se definen los siguientes objetivos de investigación:

#### 3.1.1 OBJETIVO GENERAL Y ESPECÍFICOS

El objetivo general de esta tesis es analizar en profundidad cuáles son las causas principales de retraso en los proyectos de construcción edilicios para así poder proponer herramientas de gestión adecuadas que conlleven a una reducción de los retrasos en dichos proyectos de construcción.

Para cumplir con el objetivo general se plantean los siguientes objetivos específicos:

- Realizar un análisis estadístico profundo de la literatura, proponiendo un enfoque cuantitativo para la determinación de las causas principales de retraso de los proyectos de construcción.
- Recopilar datos reales de proyectos de construcción que puedan ser utilizados para la creación de herramientas de mejora de la gestión.
- Estudiar los cronogramas y flujos de caja de los proyectos de construcción con el fin de determinar tendencias de comportamientos típicos.
- Proponer herramientas predictivas para el control de los tiempos de obra.

### 3.2 PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN

Teniendo en cuenta lo estudiado en el análisis de la literatura, y los objetivos fijados, se puede decir que las preguntas de investigación son las siguiente:

(1) ¿Es posible agrupar las causas de retrasos de los proyectos de construcción y detectar las que ocurren con mayor frecuencia e importancia en un contexto global?

(2). ¿Es posible proporcionar herramientas para la predicción y control de los proyectos de obras de construcción?

El fin último del uso de estas herramientas es el proporcionar a los gerentes de obra herramientas de toma de decisiones que conlleven a una posible reducción en los tiempos de retraso en los proyectos de construcción de infraestructuras edilicias.

# 4. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

---

## 4.1 ENFOQUE DE LA INVESTIGACIÓN

Antes de comenzar una nueva investigación, se debe adoptar una forma determinada de explicar el hecho específico, que incluye un paradigma de investigación (Mackenzie y Knipe 2006).

Una de las primeras definiciones viene dada por (Kuhn, 1962), quién afirma que un paradigma es un conjunto de suposiciones que mantienen interrelación respecto a la interpretación del mundo, además, el paradigma sirve como una guía base para los profesionales dentro de su disciplina, ya que indica las diferentes problemáticas que se deben tratar y busca un marco referencial en el cual se aclaren los interrogantes que plantean dichas problemáticas.

Otros autores definen el paradigma como un conjunto de ideas, creencias y argumentos que ayudan a las personas a crear el contexto a través del cual se explica un hecho, (Dixon & Martínez, 2014). Según (Flores, 2009) un paradigma engloba un sistema de creencias sobre la realidad, la visión del mundo y el lugar que el individuo ocupa en él. Por último, (Patton, 1999) engloba al paradigma como una guía para determinar lo que es legítimo, válido y razonable.

Estos paradigmas o visiones del mundo dependen generalmente de las orientaciones de disciplina, las inclinaciones de los investigadores y las experiencias de investigación anteriores (Creswell, 2003). La utilidad de adoptar un cierto paradigma de investigación se asocia principalmente con guiar la forma en que se aborda la explicación de un problema de investigación y determinar los métodos apropiados para dar respuestas válidas a las preguntas de investigación. A su vez permite establecer los aspectos clave necesarios para interpretar y analizar los resultados de la investigación, orientando la forma de presentar los resultados para su publicación.

Un enfoque de investigación implica la intersección de estos paradigmas con el diseño de la investigación y los métodos específicos seleccionados. Cada modelo de investigación tiene sus propias características, áreas de aplicación, ventajas y desventajas. No existe un enfoque único que tenga un problema de investigación determinado para una solución absoluta.

Hay dos tipos de enfoques de investigación basados en los paradigmas de investigación: el enfoque cuantitativo y el cualitativo, (Errasti & Jaca, 2014). Típicamente, dependiendo del campo de investigación, un enfoque es considerado como más adecuado por la comunidad científica. Sin embargo, existen áreas de investigación en la que un enfoque complementario entre ambos métodos es requerido. Este tipo de enfoque mixto permite utilizar el conocimiento y tendencias de los enfoques cualitativos, mientras que las validaciones se realizan de un modo cualitativo.

#### 4.1.1 ENFOQUE CUANTITATIVO

Este enfoque se basa principalmente en el paradigma positivista. (Ricoy, 2006) indica que el “paradigma positivista se califica de cuantitativo, empírico-analítico, racionalista, sistemático gerencial y científico tecnológico”. Por tanto, el paradigma positivista sustentará a la investigación que tenga como objetivo comprobar una hipótesis por medios estadísticos o determinar los parámetros de una determinada variable mediante la expresión numérica.

En este método cuantitativo el saber científico se caracteriza por ser racional, objetivo, se basa en lo observable, en lo manipulable y verificable, (Cuenya & Ruetti, 2010). En este paradigma la experimentación ha constituido la principal forma para generar teoría formal, (Hernández, et al., 2010).

Algunas de las principales características de este enfoque son, (Errasti & Jaca, 2014) y (Dixon & Martínez, 2014): (1) Presta más atención a las similitudes entre los casos que a las diferencias, (2) Busca modelos diseñados para explicar, predecir y controlar diferentes fenómenos. (3) Asume la realidad como dada y estática, que se puede fragmentar en unidades de estudio más pequeñas. (4) Se basa en variables objetivas y medibles, mientras que descuida el uso de elementos

subjetivos en la investigación científica. (5) El investigador debe ser independiente de la unidad de estudio. (6) Adopta un modelo hipotético-deductivo, utilizando métodos cuantitativos y estadísticos, análisis matemático y control experimental. Todos los aspectos sociales se clasifican en variables y se establecen relaciones estadísticas. (7) El tema de la investigación no se estudia uno por uno para detectar peculiaridades, sino que se utiliza una muestra representativa para generalizar los resultados a otras poblaciones. (8) Se destaca en la verificación científica de los datos y la búsqueda de eficiencia. (9) El objeto de estudio se adapta al método de investigación utilizado.

En resumen, el enfoque cuantitativo resalta elementos tales como variables (cuantitativas y cualitativas), confiabilidad (consistencia y estabilidad), validez (sin distorsión), hipótesis (formulación a probar mediante la comprobación de los hechos) y significación estadística (nivel de aceptación o rechazo y margen de error aceptado).

#### 4.1.2 ENFOQUE CUALITATIVO

Este enfoque (basado en el paradigma fenomenológico) surge como una alternativa al paradigma positivista, basado en el reconocimiento de la existencia de temas más complejos que no pueden explicarse o entenderse completamente desde la perspectiva cuantitativa (Errasti & Jaca, 2014). Tal es el caso de la mayoría de los problemas culturales o de opinión, que, debido a su complejidad y la existencia de una interrelación entre muchos elementos explícitos e implícitos, no pueden abordarse simplemente como una suma de diferentes análisis cuantitativos sobre aspectos restringidos de la realidad, sino que requieren enfoques más holísticos proporcionados por datos cualitativos.

(Gergen, 2007) (Hernández, et al., 2010) afirman que la realidad se la construye a través de diversas formas de percibirla y que por lo tanto los resultados no pueden ser generalizados en forma ajena al contexto y el tiempo.

Algunas de las principales características de este enfoque son (Rudea, 1999), (Errasti & Jaca, 2014) y (Dixon & Martínez, 2014): (1) La teoría se desarrolla desde una perspectiva introspectiva, ya que la realidad está constituida no solo

por hechos externos y observables, sino también por aspectos desarrollados por el sujeto de estudio a través de la interacción con otros y el entorno. (2) El objeto es la construcción de teorías prácticas y entendido a través de reglas y no leyes. (3) Destaca la importancia del propio fenómeno. (4) Intenta comprender una cierta realidad dentro de un contexto dado, por lo tanto, no puede ser fragmentada o dividida en variables dependientes e independientes, (5) Se basa en un estudio profundo de una situación particular, profundizando en las diferentes razones que motivan los resultados, (6) No busca explicación o causalidad, sino una comprensión profunda del fenómeno.

En resumen, la investigación cualitativa enfatiza el significado (interpretación hecha por el investigador sobre la realidad), el contexto (aspectos que forman parte y explican parcialmente los fenómenos en estudio), la perspectiva holística (sin fragmentarla en unidades de análisis más pequeñas) y la cultura (valores y creencias utilizados por el investigador durante la realización del estudio).

### 4.1.3 MÉTODO PARA LA INVESTIGACIÓN

La dualidad cuantitativo-cualitativo adopta nuevas formas que contempla a ambas posiciones como compatibles y complementarias, (Creswell, 2003).

De la combinación de ambos enfoques, surge la investigación mixta, que incluye las características individuales de cada uno de ellos, pero señalando que ambos enfoques comparten ciertas coincidencias, (Hernández, et al., 2010): (1) Llevan a cabo observación y evaluación de fenómenos, (2) Establecen suposiciones o ideas como consecuencia de la observación y evaluación realizadas, (3) Prueban y demuestran el grado en que las suposiciones o ideas tienen fundamento, (4) Revisan tales suposiciones o ideas sobre la base de las pruebas o del análisis y (5) Proponen nuevas observaciones y evaluaciones para esclarecer, modificar, cimentar y/o fundamentar las suposiciones o ideas; o incluso para generar otras.

Este enfoque es especialmente interesante en los proyectos de investigación asociados con problemas de opinión o consenso de opiniones. Por ejemplo, la

investigación con muestras grandes de datos y donde se pueden esperar resultados medibles y matemáticamente interpretables, el método cuantitativo parece más adecuado. Por otro lado, en estudios en donde se recaban las opiniones de expertos para determinar su opinión sobre un tema (como podría ser un consenso sobre las causas de retraso en los proyectos de construcción), la utilización de un método cualitativo parece más acertado.

Sobre la base de los argumentos antes mencionados, para el caso de esta investigación en los que se estudian las causas de retraso de los proyectos de construcción desde un punto de vista cuantitativo de los datos proporcionados pero que se ven influenciadas por los estudios a partir de los cuales fueron recabados (la mayor parte cualitativos de opinión y consenso) es por lo que se decide adoptar un enfoque mixto que le dará la rigurosidad estadística requerida para la generación de modelos matemáticos, pero sin perder el enfoque holístico de la situación general de los proyectos de construcción.

En particular, el uso de múltiples enfoques para dar respuestas a la misma pregunta de investigación, considerada como triangulación o validación cruzada, se considera una ventaja (Mackenzie & Knipe, 2006). La convergencia de los hallazgos obtenidos a través de los métodos de ambos enfoques aumenta la validez de los resultados ya que estos no son producto, únicamente de aspectos metodológicos.

## 4.2 ESTRATEGIA DE INVESTIGACIÓN

Para dar respuesta las preguntas planteadas, y teniendo que se considerará un enfoque mixto basado en métodos cualitativos como cuantitativos, se proponen las siguientes estrategias de investigación:

- Análisis de la revisión bibliográfica mediante el uso de herramientas estadísticas, pero con un enfoque cualitativo para determinar las principales causas de retraso de proyectos de construcción. Prueba de Levene para la determinación de la variabilidad estadística de los indicadores de importancia propuestos por los autores. Uso de diagrama de Pareto para determinar las principales causas de retraso de proyectos de construcción.

- Análisis de conglomerados para la determinación de los comportamientos típicos de los cronogramas de ejecución y de los flujos financieros de los proyectos de construcción.
- Cadenas de Markov para la generación de una herramienta de predicción de los proyectos de construcción.

### 4.3 PRUEBA DE LEVENE

Con el objetivo de evaluar la variabilidad estadística de los índices de impacto estandarizados propuestos por los diferentes autores de la literatura se decidió utilizar la prueba de Levene, (Levene, 1960).

El test prueba si  $k$  muestras tienen varianzas iguales, es decir se pone a prueba la hipótesis nula de que las varianzas poblacionales son iguales (llamado homogeneidad de varianza ú homocedasticidad). Si el P-valor resultante de la prueba de Levene es inferior a un cierto nivel de significación (generalmente se suele elegir el valor 0,05), es poco probable que las diferencias obtenidas en las variaciones de la muestra se hayan producido sobre la base de un muestreo aleatorio de una población con varianzas iguales. Por lo tanto, la hipótesis nula de igualdad de varianzas se rechaza y se concluye que hay una diferencia entre las variaciones en la población. De lo contrario, cuando el valor es mayor que 0.05, se puede decir que las varianzas son iguales o que no hay diferencia estadísticamente significativa entre los valores.

El estadístico de prueba de Levene se define como mediante la Ecuación (23), (Correa & Iral, 2006).

$$W = \frac{(N-k) \sum_{i=1}^k n_i (\bar{Z}_i - \bar{Z})^2}{(k-1) \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} (Z_{ij} - \bar{Z}_i)^2} \quad (23)$$

dónde

$W$  es el resultado de la prueba

$k$  es el número de diferentes grupos a los que pertenecen los casos muestreados

$N$  es el número total de casos en todos los grupos

$n_i$  es el número de casos en el grupo  $i$



$X_{ij}$  es el valor de la variable medida para el  $i$ -ésimo caso del  $i$ -ésimo grupo,

$Z_{ij}$  puede tener una de las siguientes tres definiciones:

- $Z_{ij} = |X_{ij} - \bar{X}_i|$ , Dónde  $\bar{X}_i$  es la media del  $i$ -ésimo subgrupo.
- $Z_{ij} = |X_{ij} - \tilde{X}_i|$ , Dónde  $\tilde{X}_i$  es la mediana del  $i$ -ésimo subgrupo.
- $Z_{ij} = |X_{ij} - \bar{X}_{10}|$ , Dónde  $\bar{X}_{10}$  es la mediana recortada al 10% del  $i$ -ésimo subgrupo.

$\bar{Z}_i = \frac{1}{n_i} \sum_{j=1}^{n_i} Z_{ij}$ , es decir la media de  $Z_{ij}$  para el grupo  $i$

$\bar{Z}_{i..} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} Z_{ij}$ , es decir la media de  $Z_{ij}$

La prueba de Levene rechaza la hipótesis de que las varianzas son iguales con un nivel de significancia  $\alpha$  si  $W > F_{\alpha, k-1, N-k}$ , donde  $F_{\alpha, k-1, N-k}$   $k$  es el valor crítico superior de la distribución F con  $k-1$  grados de libertad en el numerador y  $N-k$  grados de libertad en el denominador a un nivel de significancia.

#### 4.4 DIAGRAMAS DE PARETO

El análisis del comportamiento de esta distribución nace del economista italiano Vilfredo Pareto (1848-1923) quien realizó un estudio sobre la distribución de la riqueza, en el cual descubrió que la minoría de la población poseía la mayor parte de la riqueza y la mayoría de la población poseía la menor parte de la riqueza, (Sales, 2003).

Años más tarde, (Lorenz, 1904) desarrolló una forma de curva acumulativa para representar gráficamente la distribución de la riqueza. Éste hecho marca estadísticamente la herramienta base a través de la cual se desarrollará el principio.

(Juran, 1950) fue el primero en identificar el fenómeno de los pocos vitales y el trivial de muchos como un "universal", aplicable a muchos campos, que universalizó el uso del principio. Un año más tarde y basándose en su propio trabajo, (Juran, 1951) fue quien dio nombre al principio llamándolo "The Pareto Principle" o principio de Pareto. (Juran, 1951) también acuñó la frase "pocos

vitales y muchos triviales" y aplicó las curvas de (Lorenz, 1904) para representar este Universal en forma gráfica.

Años más tarde (Juran, 1975) aplicó el concepto de Pareto a la calidad, obteniéndose lo que hoy se conoce como la regla 80/20. Según este concepto, si se tiene un problema con muchas causas, podemos decir que el 20% de las causas resuelven el 80% del problema y el 80% de las causas solo resuelven el 20% del problema.

Esta herramienta se considera una de las siete herramientas básicas de calidad (Tague, 2005). El objetivo de un gráfico de Pareto es resaltar las causas más importantes que afectan un proceso. Mientras que el eje de las ordenadas izquierdo representa el porcentaje de ocurrencia (u otra unidad de medida) de cada causa, el eje de ordenadas derecho representa el porcentaje acumulado del número total de ocurrencias (u otra unidad total).

El mayor beneficio de usar el análisis de gráficos de Pareto es que ayuda a resaltar las causas importantes en un escenario donde hay una gran cantidad de causas a considerar. En segundo lugar, la representación esquemática es extremadamente simple de entender y permite a los investigadores enfocarse en las pocas causas clave al mostrar directamente su porcentaje de influencia. Esta herramienta estadística ayudará al análisis y determinación de los principales grupos y subgrupos de causas del retraso de los proyectos de construcción.

## 4.5 ANÁLISIS DE CONGOMERADOS

El análisis de conglomerados (o análisis clúster) tiene por objeto agrupar elementos en grupos homogéneos en función de las similitudes entre ellos. Normalmente se agrupan las observaciones, pero el análisis de conglomerados puede también aplicarse para agrupar variables, (Peña, 2002).

El análisis de conglomerados estudia tres tipos de problemas:

- (1) Partición de los datos: Cuando se dispone de datos de los que se sospecha que son heterogéneos y se desea dividirlos en un número de grupos prefijado, de manera que: (1) cada elemento pertenezca a uno y solo uno de los grupos;

- (2) todo elemento quede clasificado y (3) cada grupo sea internamente homogéneo.
- (2) Construcción de jerarquías: Cuando se desea estructurar los elementos de un conjunto de forma jerárquica por su similitud. Una clasificación jerárquica implica que los datos se ordenan en niveles, de manera que los niveles superiores contienen a los inferiores.
- (3) Clasificación de variables: En general utilizado en estudios exploratorios para dividir variables en grupos. Este estudio puede orientarnos para plantear los modelos formales y para reducir la dimensionalidad del estudio.

#### 4.5.1 MÉTODOS JERÁRQUICOS DE AGLOMERACIÓN

Los métodos de partición utilizan la matriz de datos, pero los algoritmos jerárquicos utilizan la matriz de distancias o similitudes entre elementos. Para agrupar variables se parte de la matriz de relación entre variables: para variables continuas suele ser la matriz de correlación, y para variables discretas, se construye a partir de la distancia ji-cuadrado.

Para este estudio serán utilizado un método jerárquico de agrupamiento conocido como Complete Linkage o aglomeración completa.

Los llamados métodos jerárquicos tienen por objetivo agrupar clústers para formar un nuevo o bien separar alguno ya existente para dar origen a otros dos, de tal forma que, si sucesivamente se va efectuando este proceso de aglomeración o división, se minimice alguna distancia o bien se maximice alguna medida de similitud.

- (1) Los métodos aglomerativos, también conocidos como ascendentes, comienzan el análisis con tantos grupos como individuos haya. A partir de estas unidades iniciales se van formando grupos, de forma ascendente, hasta que al final del proceso todos los casos tratados están englobados en un mismo conglomerado.
- (2) Los métodos disociativos, también llamados descendentes, constituyen el proceso inverso al anterior. Comienzan con un conglomerado que engloba a todos los casos tratados y, a partir de este grupo inicial, a través de

sucesivas divisiones, se van formando grupos cada vez más pequeños. Al final del proceso se tienen tantas agrupaciones como casos han sido tratados.

Por ejemplo, en los métodos aglomerativos, si  $n$  el conjunto de individuos de la muestra, de donde resulta el nivel  $K = 0$ , con  $n$  grupos, en el siguiente nivel se agruparán aquellos dos individuos que tengan la mayor similitud (o menor distancia), resultando así  $n - 1$  grupos; a continuación, y siguiendo con la misma estrategia, se agruparán en el nivel posterior, aquellos dos individuos (o clústers ya formados) con menor distancia o mayor similitud; de esta forma, en el nivel  $L$  tendremos  $n - L$  grupos formados. Si se continúa agrupando de esta forma, se llega al nivel  $L = n - 1$  en el que solo hay un grupo, formado por todos los individuos de la muestra.

Los métodos jerárquicos permiten la construcción de un árbol de clasificación, que recibe el nombre de dendrograma, en el cual se puede seguir de forma gráfica el procedimiento de unión seguido, mostrando que grupos se van uniendo, en qué nivel concreto lo hacen, así como el valor de la medida de asociación entre los grupos cuando éstos se agrupan, (Peña, 2002).

Existen diversos métodos de jerárquicos de aglomeración, desde métodos de aglomeramiento simple (de distancia mínima o similitud máxima), métodos de aglomeramiento completos (de distancia máxima o similitud mínima), estrategias de distancia o similitud no ponderada, estrategias de distancia, similitud de promedio ponderado, métodos basados en el centroide, método de Ward (en el cual se unen los dos clústers para los cuales se tenga el menor incremento en el valor total de la suma de los cuadrados de las diferencias, dentro de cada cluster, de cada individuo al centroide del cluster).

Para esta investigación será utilizado un método jerárquico de aglomeración de distancia máxima o similitud mínima, conocido como complete linkage. Este método mide la proximidad entre dos grupos calculando la distancia entre sus objetos más lejanos o la similitud entre sus objetos menos semejantes y a diferencia de los métodos de enlace simple, conduce a conglomerados más compactos y menos sensibles a valores extremos. Debido a que el proceso que se

estudia suele tener variabilidad y entendiendo que la presencia de datos extremos no debería afectar en gran medida los resultados es por lo que se seleccionó este método aglomerativo.

#### 4.5.2 MÉTODO DEL VECINO LEJANO O DE DISTANCIA MÁXIMA

En este método, también conocido como el procedimiento de amalgamamiento completo (complete linkage), se considera que la distancia o similitud entre dos clústers hay que medirla atendiendo a sus elementos más dispares, o sea, la distancia o similitud entre conglomerados viene dada, respectivamente, por la máxima distancia (o mínima similitud) entre sus componentes.

Así es que en la etapa  $K$ -ésima hay formados  $n - K$  clústers, la distancia y similitud entre los clústers  $C_i$  y  $C_j$  (con  $n_i$  y  $n_j$  elementos respectivamente), serán la Ecuación (24) y Ecuación (25).

$$d(C_i, C_j) = \text{Max}\{d(x_l, x_m)\} \quad l = 1, \dots, n_i ; m = 1, \dots, n_j \quad (24)$$

$$s(C_i, C_j) = \text{Min}\{s(x_l, x_m)\} \quad l = 1, \dots, n_i ; m = 1, \dots, n_j \quad (25)$$

Para seguir el método de aglomeración la estrategia seguida en el siguiente nivel,  $K + 1$ , será:

En el caso de emplear distancias, se unirán los clústers  $C_i$  y  $C_j$  si:

$$d(C_i, C_j) = \text{Min}\{d(C_i, C_j)\} = \text{Min}\{\text{Max}\{d(x_l, x_m)\}\} \quad (26)$$

En el caso de emplear similitudes, se unirán los clústers  $C_i$  y  $C_j$  si:

$$s(C_i, C_j) = \text{Max}\{s(C_i, C_j)\} = \text{Max}\{\text{Min}\{s(x_l, x_m)\}\} \quad (27)$$

dónde:

$$i, j = 1, \dots, n - k, \text{ además de que } i_1 \neq j_1, \dots, i_{n-k} \neq j_{n-k}$$

$$l = 1, \dots, n_{i_1}; m = 1, \dots, n_{j_1}$$

$$x_l \in C_{i_1}; x_m \in C_{j_1}$$

## 4.6 CADENAS DE MARKOV

Un proceso estocástico es una colección o familia de variables aleatorias  $\{X_t, \text{ con } t \in T\}$ , ordenadas según el subíndice  $t$  que en general se suele identificar con el tiempo.

Por tanto, para cada instante  $t$  tendremos una variable aleatoria distinta representada por  $X_t$ , con lo que un proceso estocástico puede interpretarse como una sucesión de variables aleatorias cuyas características pueden variar a lo largo del tiempo. A los posibles valores que puede tomar la variable aleatoria se le denominaran estados, por lo que se puede tener un espacio de estados discreto y un espacio de estados continuo.

Por otro lado, la variable tiempo puede ser de tipo discreto o de tipo continuo. En el caso del tiempo discreto se podría tomar como ejemplo que los cambios de estado ocurran cada día, cada mes o cada año. En el caso del tiempo continuo, los cambios de estado se podrían realizar en cualquier instante. Por tanto, dependiendo de cómo sea el conjunto de subíndices  $T$  y el tipo de variable aleatoria dado por  $X_t$  se puede establecer la siguiente clasificación de los procesos estocásticos:

- Si el conjunto  $T$  es continuo, por ejemplo,  $R^+$ , diremos que  $X_t$  es un proceso estocástico de parámetro continuo.
- Si por el contrario  $T$  es discreto, por ejemplo,  $N$ , diremos que nos encontramos frente a un proceso estocástico de parámetro discreto.
- Si para cada instante  $t$  la variable aleatoria  $X_t$  es de tipo continuo, diremos que el proceso estocástico es de estado continuo.
- Si para cada instante  $t$  la variable aleatoria  $X_t$  es de tipo discreto, diremos que el proceso estocástico es de estado discreto.

Una Cadena es un proceso estocástico en el cual el tiempo se mueve en forma discreta y la variable aleatoria sólo toma valores discretos en el espacio de estados. Un proceso de saltos puros es un proceso estocástico en el cual los cambios de estados ocurren en forma aislada y aleatoria pero la variable aleatoria sólo toma valores discretos en el espacio de estados. En un proceso continuo los

cambios de estado se producen en cualquier instante y hacia cualquier estado dentro de un espacio continuo de estados, (Rincón, 2012).

Como el espacio de variables que se tratarán en este estudio son discretas en el tiempo, a continuación, se describirá el modelo matemático que lo sustenta. Es así que, en el caso de procesos estocásticos con espacio de estados discreto, una secuencia de variables que indique el valor del proceso en instantes sucesivos suele representarse según la Ecuación (28).

$$\{X_0 = x_0, X_1 = x_1, \dots, X_{n-1} = x_{n-1}, X_n = x_n\} \quad (28)$$

En la Ecuación (28) cada variable  $X_i, i = 0, \dots, n$  tiene una distribución de probabilidades que, en general, es distinta de las otras variables aunque podrían tener características comunes. El principal interés del estudio a realizar en el caso discreto es el cálculo de probabilidades de ocupación de cada estado a partir de las probabilidades de cambio de estado. Si en el instante  $n$  se está en el estado  $X_n$  y se quiere determinar con qué probabilidad se estará en el estado  $X_{n+1}$  en el instante siguiente  $n + 1$ . Esta probabilidad se denotará como se indica en la Ecuación (29).

$$P(X_{n+1} = x_{n+1} | X_1 = x_1, X_2 = x_2, \dots, X_n = x_n) \quad (29)$$

Una cadena de Markov corresponde a una clase específica de proceso estocástico en el campo de los modelos probabilísticos (Bertsekas & Tsitsiklis, 2000) y (Ross, 2003) en el que se conocen el estado actual  $X_n$  y los estados anteriores  $X_1, \dots, X_n$ . Por lo tanto, para  $n = 1, 2, \dots, n$  y para cualquier sucesión de estados  $x_1, \dots, x_n$  la Ecuación (29) se puede redefinir como Ecuación (30).

$$P(X_{n+1} = x_{n+1} | X_1 = x_1, X_2 = x_2, \dots, X_n = x_n) = P(X_{n+1} = x_{n+1} | X_n = x_n) \quad (30)$$

Las cadenas de Markov tienen la probabilidad de transición estacionaria, es decir que para cada par de estados  $x_i$  e  $x_j$ , existe una probabilidad de transición  $p_{ij}$  que queda establecida en la Ecuación (31).

$$P(X_{n+1} = x_j | X_n = x_i) = p_{ij} \quad \text{para } n = 1, 2, \dots, n \quad (31)$$

Para un proceso estocástico con  $n$  estados posibles  $x_1, \dots, x_n$ , la notación correspondiente de la probabilidad de transición es  $p_{ij}^{(m)}$  y queda definida

como:  $p_{ij}^{(m)} = P(X_{n+1} = x_j | X_n = x_i)$ , donde  $p_{ij}^{(m)}$  es el elemento en la fila  $i$  y la columna  $j$  de la matriz de transición  $P^{(m)}$  con  $m = 1, 2, \dots, n - 1$ . Es así que la matriz de transición  $P^{(m)}$  de la cadena de Markov queda definida mediante la Ecuación (32).

(32)

$$P^{(m)} = \begin{array}{c|ccccc} \text{Estado} & 0 & 1 & 2 & \dots & n \\ \hline 0 & p_{00}^{(m-1)} & p_{01}^{(m-1)} & p_{02}^{(m-1)} & \dots & p_{0n}^{(m-1)} \\ 1 & p_{10}^{(m-1)} & p_{11}^{(m-1)} & p_{12}^{(m-1)} & \dots & p_{1n}^{(m-1)} \\ 2 & p_{20}^{(m-1)} & p_{21}^{(m-1)} & p_{22}^{(m-1)} & \dots & p_{2n}^{(m-1)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ n & p_{n0}^{(m-1)} & p_{n1}^{(m-1)} & p_{n2}^{(m-1)} & \dots & p_{kn}^{(m-1)} \end{array}$$

Hay varios casos en los que las cadenas de Markov se han utilizado para predicciones. Como antecedentes cabe destacar a (Yuan, 1999) que utilizó cadenas de Markov para predecir las ubicaciones subcelulares de proteínas. Otro ejemplo viene dado por (Logofet & Lesnaya, 2000) quienes las utilizaron para desarrollar un modelo de predicción ecológica, ente otros autores.

A pesar de ello, en la literatura no se han encontrado estudios que utilicen cadenas de Markov en el campo de la gestión de la construcción civil o para la predicción de análisis de valor ganado. Es por ello que este método, además de considerarse asertivo por la potencialidad de predicción, es a su vez innovador en el campo de estudio.

## 4.7 CONCLUSIONES

Durante esta tesis, se adoptó un enfoque mixto, utilizando metodologías cuantitativas, pero con enfoques cualitativos, tratando de englobar el conocimiento y buscando entender la variabilidad en la opinión de los expertos en el tema.

En particular, la tesis se plantea desde una fase exploratoria, basada en el análisis de la literatura y de lo que se conoce acerca de las causas de retraso en los proyectos de construcción. De esta fase se pretende determinar las principales causas de retraso para encausar el estudio y mejora de los proyectos. Se utilizarán



pruebas de Levene para la determinación de la variabilidad de los índices de importancia de las causas de retraso de la literatura. Se utilizarán diagramas de Pareto para determinar las principales causas de retraso.

Posteriormente, utilizando las herramientas estadísticas tales como análisis de conglomerados y cadenas de Markov se construirán métodos de clasificación y predicción que permitan a los gestores de proyecto entender el comportamiento de sus proyectos de construcción y ayuden a predecir los comportamientos futuros.

En los siguientes capítulos se presentarán más detalles sobre los métodos y los principales resultados de cada paso de la tesis.



# 5. CAUSAS DE RETRASO DE PROYECTOS DE CONSTRUCCIÓN

---

## 5.1 INTRODUCCIÓN

Como hemos visto en el Capítulo 2, la literatura es extensa en lo que respecta a las causas de retraso de los proyectos de construcción. Pero una de las conclusiones más importantes de un análisis preliminar realizado en esta etapa es que los estudios estadísticos revelan que existe una alta variabilidad de los datos relativos a la importancia que los autores dan a las causas de retrasos.

Como base de esta tesis se pretende conocer de primera mano las causas de retraso de los proyectos de construcción con el objetivo de proponer metodologías estadísticas para predecir el comportamiento de los mismos.

Antes de estudiar profundamente el comportamiento de los proyectos debemos tener una orientación hacia dónde encausar los estudios predictivos, es por ello que el análisis casuístico resulta de vital importancia. En este capítulo se busca entonces un estudio estadístico profundo de la literatura con el fin de determinar verazmente la variabilidad de los índices de importancia que proponen los autores. Por otro lado, se buscará proponer un método adecuado para determinar las causas principales de retraso que tenga en cuenta la realidad de la literatura estudiada.

De este modo se podrá determinar la o las principales causas de retraso de los proyectos de construcción y a partir de las mismas orientar las metodologías predictivas hacia los focos de mayor problema.

## 5.2 METODOLOGÍA

La metodología utilizada para la determinación de las causas principales de retraso de proyectos de construcción se dividió en las siguientes fases:

Fase (1) En primer lugar, se recopiló de la literatura todos los estudios relacionados con las causas de retraso de los proyectos de construcción identificando si los estudios indicaban el índice de importancia de las causas principales.

Fase (2) La clasificación de las causas de retrasos de los proyectos de construcción encontrados en la revisión de la literatura se llevó a cabo, logrando una clasificación primaria en grupos y sub-grupos de similitud. Se propone una clasificación general en dos niveles, un nivel primario para causas principales y un nivel secundario para grupos de causas más específicas.

Fase (3) Se estudió la variabilidad estadística de los índices de importancia propuestos en la literatura. Este análisis permitió determinar si la calidad de los índices de importancia propuestos es adecuada para determinar las causas principales de retraso o si se deben buscar otros métodos para determinar la importancia de las causas recopiladas en el punto. Se propuso un método de conteo de aparición para determinar las principales causas de retraso y se estudió la variabilidad estadística, resultando este método el más adecuado para medir la importancia relativa de las causas de retraso en los proyectos de construcción.

Fase (4) Después de determinar la mejor manera de medir la importancia de las demoras en los proyectos de construcción, se llevó a cabo un estudio estadístico utilizando diagramas de Pareto para determinar la causa o causas principales y su peso relativo. Esta fase tiene como resultado una lista de las causas principales, pudiendo definir familias principales de problemas que afectan los proyectos y brindando detalles más específicos de las causas dentro de los subgrupos.

Estas fases se describen con más detalle en los siguientes párrafos:

### 5.2.1 FASE I: REVISIÓN DE LA LITERATURA

Para la realización de la revisión de la literatura, se construyó una base de datos de artículos referentes a las causas de retraso de los proyectos de construcción.

Existen diferentes clasificaciones de los tipos de documentos que se pueden manejar en una revisión bibliográfica. Una de las más utilizadas es aquella que distingue entre documentos: (1) Primarios u originales, que transmiten la información directa, artículos originales y tesis, (2) secundarios que ofrecen descripciones de los documentos primarios como catálogos, bases de datos o revisiones sistemáticas y (3) terciarios que sintetizan los documentos primarios y secundarios y producen desarrollo y discusión, (Pedraz, 2007).

La base de datos de artículos referentes a causas de retraso de proyectos de construcción que ha sido recopilada en el Capítulo 2 fue el punto de partida de los análisis estadísticos. De estos artículos y mediante una selección uno a uno, se consideraron finalmente todos los artículos que proponen un listado de causas de retrasos en proyectos de construcción. En lo que respecta a la calidad de los artículos, únicamente han sido considerados los artículos originales con análisis exploratorios, técnicas de encuesta, paneles con expertos o similares que propongan causas de retraso en proyectos, independientemente del país.

### 5.2.2 FASE II: DEFINICIÓN DE FAMILIAS DE AGRUPAMIENTO

Debido a que no se encontró un método adecuado para clasificar las causas del retraso del proyecto de construcción, como ha quedado explicado en el Capítulo 2 de revisión de la literatura, las causas encontradas en los artículos que han formado parte de la base de datos se clasificaron teniendo en cuenta las fases que conforman un proyecto de construcción. El proceso de construcción se puede dividir en tres fases principales: la concepción, el diseño y la construcción, (Chan & Kumaraswamy, 1997).

La concepción se basa en la existencia de una necesidad. Para que un proyecto se origine debe existir una necesidad insatisfecha, como, por ejemplo, un edificio

para solucionar un problema habitacional, un puente que permita la comunicación de una zona aislada, o cualquier necesidad de infraestructura civil de una ciudad. En esta etapa se analizan las necesidades, seleccionándose las más relevantes, para lo cual se deben considerar los siguientes aspectos: (1) Identificar las causas que originan la necesidad de un proyecto, (2) establecer los objetivos que debe satisfacer el proyecto y (3) priorizar las necesidades en función de los objetivos establecidos. Se propone en una primera etapa soluciones a nivel de conceptualización y se plantean estudios de factibilidad para determinar si el proyecto en estudio es viable desde un punto de vista medioambiental, técnico, económico, administrativo y legal.

La etapa de diseño de obras se refiere a todo lo relacionado con el estudio, investigación y planificación del proyecto de construcción. A su vez puede ser subdividida a su vez en diferentes sub-etapas o fases de diseño del proyecto como ser el estudio del terreno, el diseño arquitectónico, el diseño estructural y el diseño de las instalaciones.

Finalmente, y luego de aprobado los permisos pertinentes se da inicio a la construcción que, según (Roman, 1999) se suele dividir entre la fase de implantación que son el conjunto de operaciones relacionadas con el armado de la infraestructura provisoria de obra, la fase de cimentación, en la que se construyen todas las estructuras necesarias para las descargas estructurales a tierra, la fase de ejecución de la estructura, la fase de ejecución de albañilería, instalaciones y terminaciones.

La mayor parte de los retrasos se suelen producir durante la fase de construcción, en donde la conjunción de diferentes actores y las incertidumbres juegan un papel preponderante, (Chan & Kumaraswamy, 1997).

Una vez aclaradas las fases que conforman los proyectos de construcción, se decidió dividir las causas de retraso de proyectos de construcción mencionadas en los artículos de la base de datos utilizando una técnica de agrupación sucesiva. De este modo las causas de retraso principales que se asemejan se englobaron en grupos que se muestran en dos niveles diferentes. Por un lado, el Nivel 1 de aglomeración de causas principales de retraso en los proyectos de construcción



### 5.2.2.2 DISEÑO

El grupo Nivel 1 “Diseño” incluye las causas de retraso del proyecto de construcción relacionadas con los estudios previos, estudios de factibilidad de terreno, factibilidad económica, rentabilidad de la inversión, el cálculo de la estructura y el presupuesto del proyecto. Dentro de este grupo, el subgrupo Nivel 2 “Demoras en el diseño” incluye las causas relacionadas con los retrasos en la producción de documentos y planes de diseño y en la obtención de su aprobación.

El subgrupo “Diseño complejo”, como su nombre lo indica, son causas que explican los retrasos debido a la complejidad del proyecto que se está diseñando. El subgrupo Nivel 2 “Errores de diseño” se refiere a errores o eventos inesperados que ocurren durante la fase de diseño, como discrepancias entre diseñadores, falta de comprensión de los requisitos del cliente o uso incorrecto del software de cálculo. Los subgrupos “Mala estimación de costes” y “Mala estimación de plazos” se refieren a la subestimación de los costes y las fechas de finalización, lo que lleva a reformulaciones de proyectos.

Finalmente, el subgrupo Nivel 2 “Falta de estudios previos” se refiere a la falta de estudios o a la mala calidad de los estudios utilizados para determinar las condiciones del sitio, lo que produce eventos imprevistos durante la fase de construcción, sobretodo en la etapa de cimentaciones, en dónde la precisión con la que se determina las características resistentes del suelo juega un papel fundamental en la decisión del diseño de la misma.

### 5.2.2.3 EJECUCIÓN

El grupo Nivel 1 “Ejecución” es el grupo más amplio y complejo y contiene las causas relacionadas con problemas imprevistos durante la fase de construcción. Este grupo se divide en nueve subgrupos Nivel 2. El subgrupo “Cambios durante la construcción” se refiere a los cambios que deben realizarse debido a las demandas del cliente o contratista y que terminan extendiendo el tiempo estimado de finalización.



El subgrupo “Controles de calidad” se refiere a las inspecciones que se llevan a cabo durante las fases intermedias de construcción y que pueden demorar el inicio de una nueva tarea o resultar en la demolición de cualquier construcción que no cumpla con las especificaciones de calidad. El subgrupo “Errores constructivos” se refiere a eventos imprevistos que se derivan de errores en el procedimiento de construcción, ya sea por desviaciones del proyecto original o por una ejecución incorrecta. Estos errores suelen implicar la demolición o reconstrucción de una parte del proyecto.

El subgrupo "Falta de comunicación" se refiere a las causas del retraso atribuido a la mala comunicación entre las partes. La falta de comunicación conduce a malentendidos, retrasos en la toma de decisiones o toma de decisiones equivocada, lo que eventualmente conduce a retrasos en el proyecto.

El subgrupo “Mala dirección de obra” se refiere a las malas decisiones tomadas por director de obra, ya sean decisiones incorrectas o decisiones que no fueron tomadas a tiempo. El subgrupo “Sitio / Movilización / Transporte” se refiere a los problemas que surgen debido a la geología del sitio y las dificultades con el traslado de las personas, la maquinaria y la logística de entrega de materiales.

El subgrupo “Consultor / Contratista” incluye las causas de la demora que son atribuibles a los consultores y/o problemas con el contratista, ya sea diferencias de criterio u cualquier discrepancia con cualquiera de estas dos figuras de interés. El subgrupo “Seguridad / Accidentes” contiene las causas de retraso atribuidas a medidas de seguridad extremadamente sobreprotectoras o una falta de seguridad, problemas que pueden generar retrasos y demoras o eventualmente terminar en accidentes de trabajo durante la ejecución.

El grupo Nivel 2 "sub-contratos" agrupa las causas atribuibles a contratistas externos que actúan bajo la responsabilidad de la empresa constructora. Estos generalmente incluyen proveedores de concreto, saneamiento, electricidad y pintura, entre otros.

#### 5.2.2.4 MANO DE OBRA

El grupo Nivel 1 “Mano de obra” se refiere a todas las causas de retraso atribuibles con problemas del personal, las mismas incluyen desde problemas con el personal altamente calificado hasta con trabajadores, constructores y operarios. Este grupo Nivel 1 tiene cinco subgrupos Nivel 2. El subgrupo "Aspectos socioculturales" se refiere a todas las causas de demora debidas a los aspectos religiosos, culturales o sindicales que afectan la productividad de la fuerza laboral.

El subgrupo Nivel 2 "Baja productividad" reúne todas las causas de retraso relacionados con las bajas tasas de producción de la mano de obra. El subgrupo “Conflictos / Relaciones” se refiere estrictamente a conflictos de personal; conflictos internos entre trabajadores, demandas laborales o conflictos con sindicatos que pueden surgir durante el desarrollo del proyecto. El subgrupo “Falta de experiencia” reúne las causas atribuibles a la falta de conocimiento o la capacitación insuficiente del personal asignado a una tarea. Finalmente, el subgrupo “Falta de trabajadores” se refiere a la dificultad de encontrar personal adecuado para la tarea asignada en el proyecto.

#### 5.2.2.5 MAQUINARIA

El grupo “Maquinaria” se refiere a las causas de retraso que pueden atribuirse al rendimiento, la calidad o el manejo del equipo de construcción durante la fase de ejecución y está compuesto por tres subgrupos Nivel 2: “Calidad de la maquinaria”, que abarca las causas que se refieren a la calidad de los instrumentos o equipos de construcción, lo que podría llevar a ralentizaciones en el trabajo; “Mal manejo de la maquinaria”, que se refiere a los retrasos causados por el uso incorrecto del equipo, ya sea por falta de conocimiento o por imprudencia del trabajador; y “Adquisición de la maquinaria”, que abarca las causas de la demora debido a la dificultad para obtener la maquinaria adecuada para las tareas a realizar.

### 5.2.2.6 MATERIALES

El grupo “Materiales”, como su nombre lo indica, se refiere a los retrasos causados por problemas con los materiales y se divide en seis subgrupos Nivel 2. El subgrupo “Calidad de los materiales” contiene las causas de la demora debida a la mala calidad de los materiales, lo que puede resultar en la necesidad de reposición de los suministros o la demolición y/o refuerzos de la construcción. El subgrupo “Cambio de materiales” conglo mera a las causas de retraso en los proyectos de construcción que hacen referencia a cambios en las especificaciones de los materiales, lo que desencadena en nuevos diseños y la búsqueda y compra de nuevos materiales.

El subgrupo “Entrega de materiales” reúne las causas de retraso que pueden asignarse a los proveedores, y el subgrupo “Precio de los materiales” se refiere a las fluctuaciones en el precio de los suministros, lo que da lugar a nuevas autorizaciones, refinanciación y procedimientos administrativos.

Finalmente, el subgrupo “Uso inapropiado del material” se refiere al uso incorrecto por parte del personal, ya sea debido a la falta de capacitación o imprudencia, lo que conduce a errores de construcción, reacondicionamiento y reposición de suministros.

### 5.2.2.7 CLIMA

“Clima” es un grupo Nivel 1 que reúne las causas atribuibles a los problemas climáticos y se divide en dos subgrupos en función de la gravedad: “Desastres naturales” y “Inclencias del tiempo”. Finalmente, el grupo “Otros” abarca las causas de demora encontradas en la literatura bajo ese nombre, y para las cuales no hay más especificaciones que permitan incluirlas en uno de los otros grupos.

De este modo se han definido 8 familias Nivel 1 y 35 familias Nivel 2 que serán estudiadas en las siguientes secciones con el fin de determinar, si existe, cuál o cuáles son los grupos principales que reflejan las causas de retraso de proyectos de construcción de mayor importancia.

### 5.2.3 FASE III: MEJOR MÉTODO PARA MEDIR LA IMPORTANCIA DE LAS CAUSAS DE RETRASO

Esta sección buscaba determinar si los índices de importancia estandarizados que proponen los autores son un método adecuado para medir la importancia de las causas de retraso de los proyectos de construcción, o si otros métodos, tal como puede ser el método de conteo de aparición de causas, deben podían además ser tenidos en cuenta.

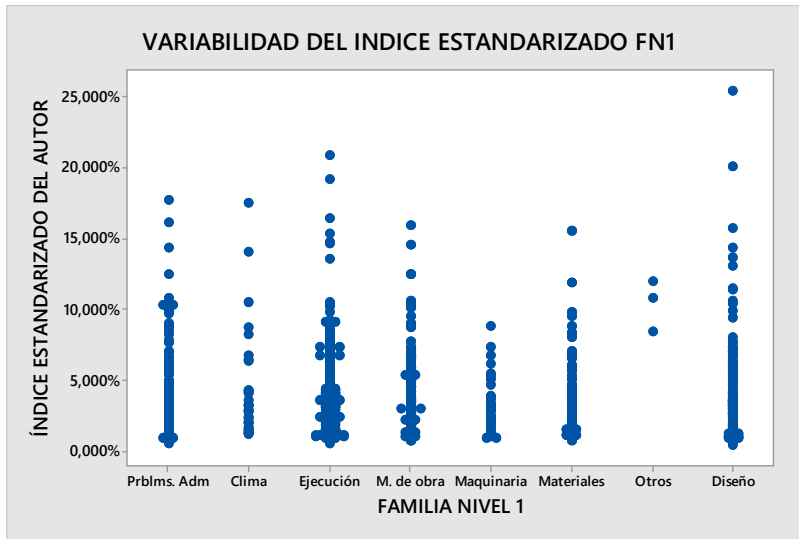
Para determinar la variabilidad estadística de los índices de importancia estandarizados se decidió utilizar la prueba de (Levene, 1960). La prueba de Levene es una prueba estadística inferencial utilizada para evaluar la igualdad de las varianzas para una variable calculada para dos o más grupos.

Para realizar una prueba de Levene, es necesario que los datos medidos estén en una escala unificada. Es por ello que fueron utilizados los datos presentados en el Anexo A, que muestran los valores de índices de impacto propuestos por los autores después de ser estandarizados bajo una única escala, tal y como se ha explicado en la sección 2.3.2.

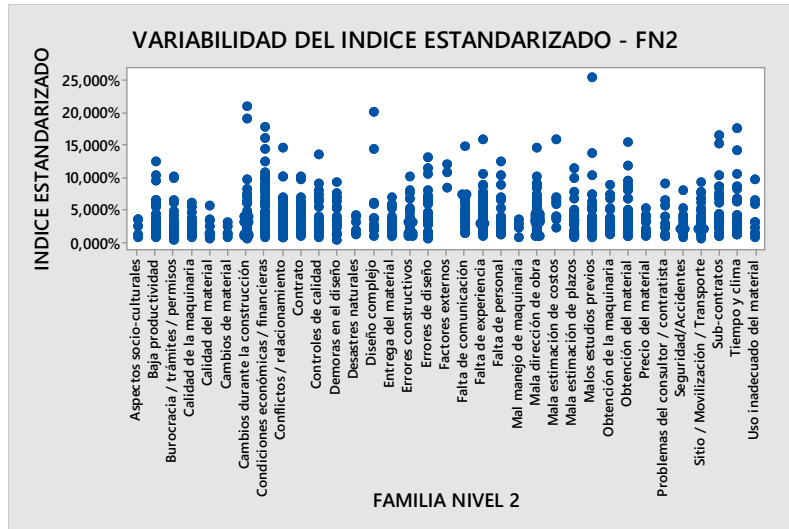
Para la realización de este estudio, además de tomar en cuenta los índices de importancia estandarizados propuestos por los autores, otro método adicional para medir la importancia de la causa de retraso fue estudiado: el método de conteo, (Al-Momani, 2000) y (Ahmed, et al., 2003). Mediante esta metodología se propone que la importancia de una causa de retraso viene dada por la cantidad de veces que la misma es mencionada en la literatura. Estos datos también se resumen en el Anexo A.

De este modo se estudiaron dos métodos diferentes, uno mediante el uso de índices de importancia estandarizados y otro también dependiente de la cantidad de menciones que tuvo cada una de las causas de retraso de proyectos de construcción. Se realizó una gráfica de valores individuales del índice de impacto estandarizados para los grupos Nivel 1 y Nivel 2 propuestos, Figura 5. Este gráfico muestra cómo el índice de impacto difiere en gran medida de un artículo a otro para el mismo grupo de Nivel 1 (Figura 5.a) o subgrupo de Nivel 2 (Figura 5.b).

5. Causas de retraso de los proyectos de construcción



a)



b)

Figura 5, Causas de retraso en proyectos de construcción – grafica de valores individuales para índice estandarizado.

Se debe tener en cuenta que no fue posible realizar este gráfico para las causas individuales de retraso de proyectos de construcción debido a la gran cantidad de causas disponibles; las causas se clasificaron en los grupos de Nivel 1 y los subgrupos de Nivel 2 para poder expresarse en el gráfico.

De los datos analizados se puede deducir que existe una gran variabilidad en los índices propuestos por los autores. Por ejemplo, para la causa "Baja productividad", el valor de importancia dado en (Marzouk & El-Rasas, 2014) tiene un valor de 10.3 en el índice de importancia estandarizado, mientras que los valores estandarizados y ajustados son 1.3 y 1.0 en (Al-Kharashi & Skitmore, 2009) y (Gündüz, et al., 2013), respectivamente. Otro ejemplo se da en la causa "Falta de comunicación entre las partes", que se mencionó en 28 artículos diferentes y a la que, por ejemplo, (Challal & Tkiouat, 2012) asignó un valor estandarizado de 14.7, mientras que (Ahmed, et al., 2003) propuso un valor de 1.7.

Para evaluar la variabilidad de los datos, se realizó la prueba de igualdad de varianzas (Figura 6), de donde se puede concluir que el método de índice de impacto estandarizado (como método para determinar las causas principales de retraso en proyectos de construcción) presenta una gran variabilidad para los distintos valores, imposibilitando que la evidencia muestre si un grupo tiene más importancia que otro. La variabilidad de estas medidas es tal que no es posible hacer distinciones entre los grupos estudiados (ver el valor de p resultante mayor que 0.05 para la comparativa entre familias Nivel 1).

En el caso del test de igualdad de varianzas para las familias Nivel 2, no fue posible obtener un gráfico resumen debido a que mediante la utilización de las herramientas informáticas disponibles no fue posible calcular los intervalos de comparación debido a la multiplicidad de datos disponibles. No obstante, el p-valor obtenido de la aplicación del test de Levene es de 0,897 por lo que tampoco es posible definir una familia Nivel 2 más importante que otra mediante la utilización de los índices de importancia estandarizados.

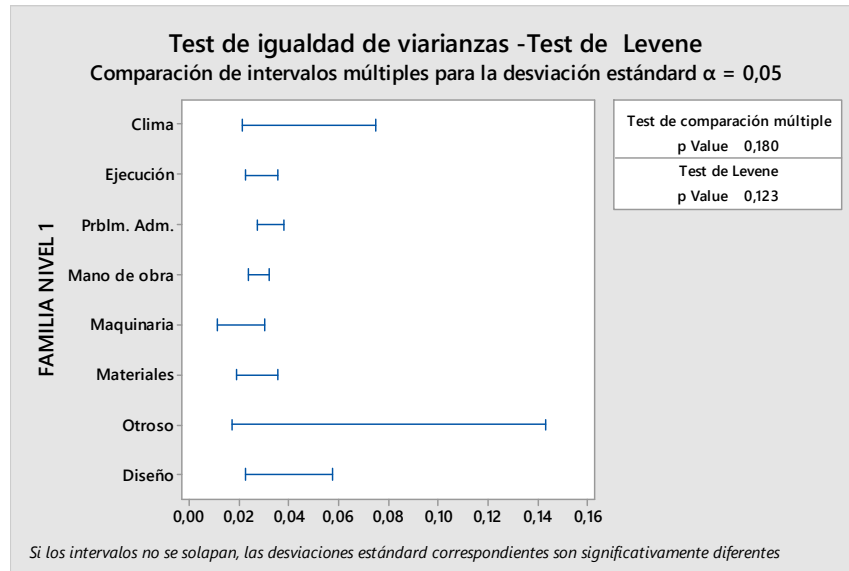


Figura 6, Test de igualdad de varianzas para Familia Nivel 1

La corriente de pensamiento conocida como "Gestión basada en la evidencia" estudia el problema de la variabilidad de los datos en los estudios de causa raíz (Pfeffer & Sutton, 2006). Uno de los principales resultados es que en las industrias donde es necesario recurrir a la opinión de expertos para determinar las causas raíz, es inevitable que los resultados se vean influenciados por criterios personales, experiencia de vida y organizaciones o lugares donde se realizaron dichos estudios.

En estos casos, separar la "verdad" del "ruido" obtenido por los criterios subjetivos suele ser un desafío, y se deben realizar análisis adicionales para determinar qué evidencia se puede deducir en base a un análisis cuantitativo desde un punto de vista cualitativo. Teniendo en cuenta la gran cantidad de datos recopilados y la variabilidad dentro de los mismos, al referirse al análisis de los índices propuestos por los autores, no hay evidencia que sugiera que un grupo de Nivel 1 sea más importante que otro, tampoco que ningún grupo Nivel 2 lo sea. Los índices de impacto estandarizados se rechazaron como un indicador para

medir el grado de impacto de las causas de la demora y se determinó la utilización del conteo de menciones.

El método de conteo, a pesar de ser más simple, evita la variabilidad de la conversión de los índices en diferentes escalas y evade el uso de indicadores que pueden no estar expresando lo mismo. Además, el método de conteo es más adecuado para el análisis de Pareto que se lleva a cabo para determinar qué familia o familias son las principales, ya que la certeza de los valores de repetición presenta menos sesgo estadístico.

### 5.3 FAMILIAS PRINCIPALES DE CAUSAS DE RETRASO

Después de determinar la mejor manera de medir la importancia de las demoras del proyecto de construcción, se realizó un estudio estadístico utilizando diagramas de Pareto para identificar las causas principales de retraso.

Mediante la utilización de diagramas de Pareto se pretende definir el orden de importancia de las familias de causas de retraso determinadas anteriormente utilizando el método de conteo y de este modo proporcionar detalles más específicos sobre cuál familia presenta mayor tendencia de repetición que otra y poder dar detalles más específicos sobre el comportamiento de cada familia nivel 1 y de sus respectivas familias nivel 2. La Figura 7 muestra el diagrama de Pareto para la familia Nivel 1 dentro del continente de África, análogamente la Figura 8 muestra la familia Nivel 1 para USA, la Figura 9 muestra la familia Nivel 1 para Asia, la Figura 10 muestra la familia Nivel 1 para Turquía, la Figura 11 muestra la familia Nivel 1 para Europa, y finalmente la Figura 12 muestra la familia Nivel 1 con todos los datos disponibles.



5. Causas de retraso de los proyectos de construcción

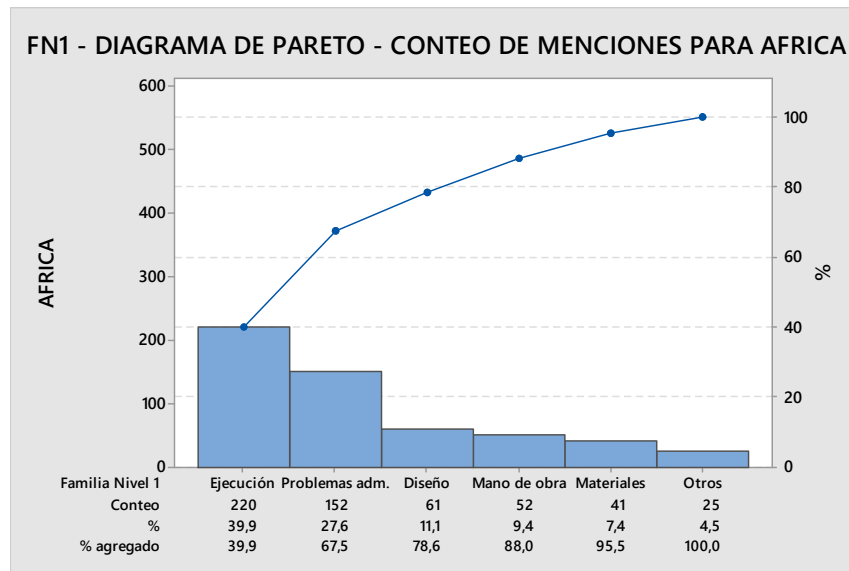


Figura 7, Diagrama de Pareto para el Grupo Nivel 1 – África

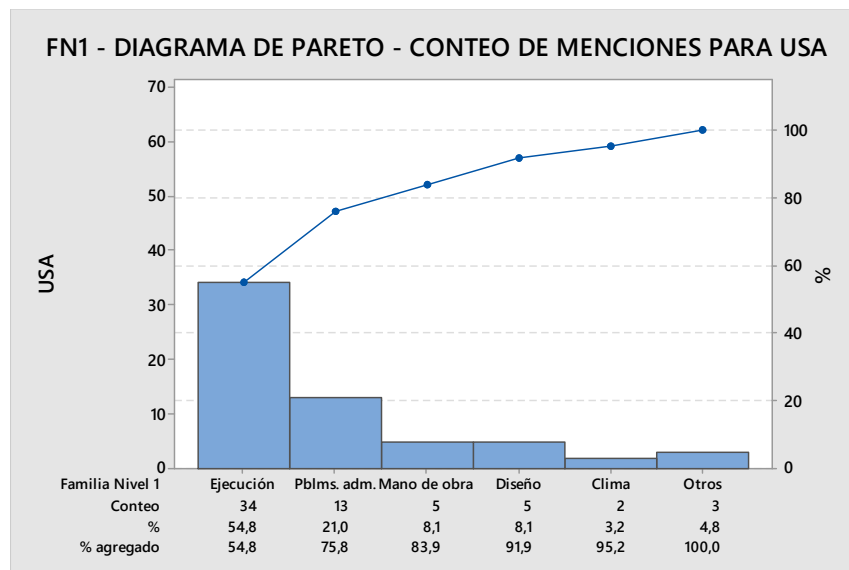


Figura 8, Diagrama de Pareto para el Grupo Nivel 1 – USA

5. Causas de retraso de los proyectos de construcción

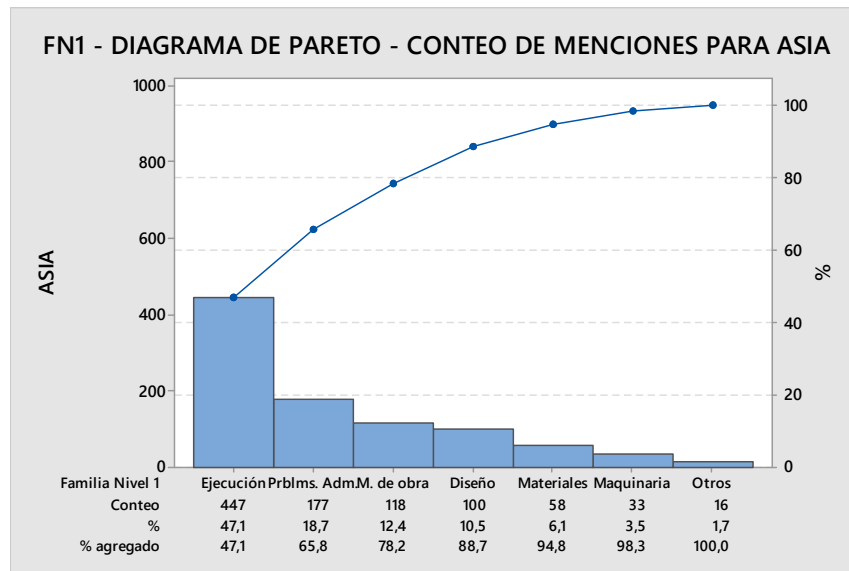


Figura 9, Diagrama de Pareto para el Grupo Nivel 1 – Asia

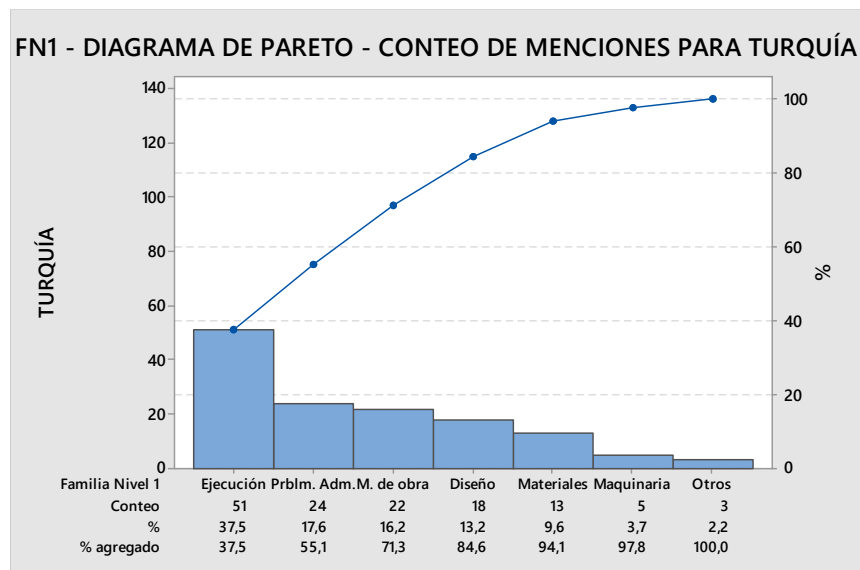


Figura 10, Diagrama de Pareto para el Grupo Nivel 1 – Turquía

5. Causas de retraso de los proyectos de construcción

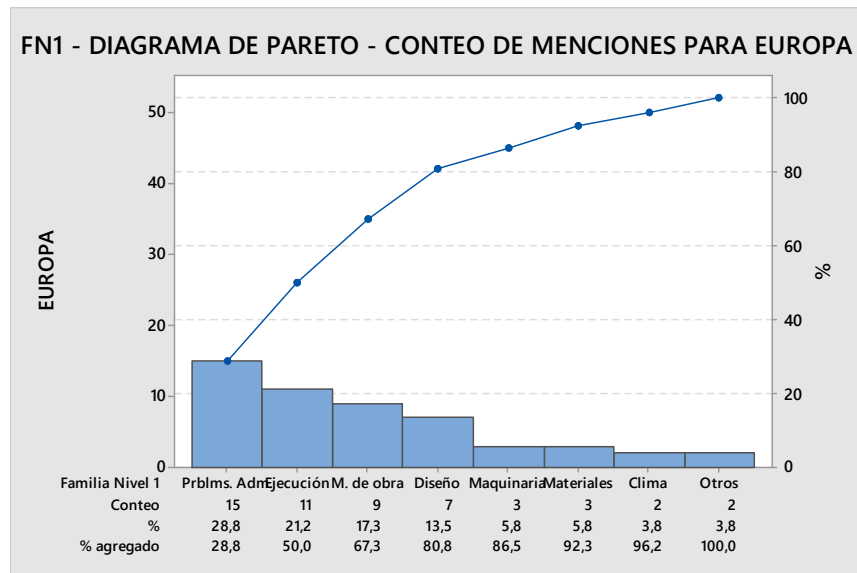


Figura 11, Diagrama de Pareto para el Grupo Nivel 1 – Europa

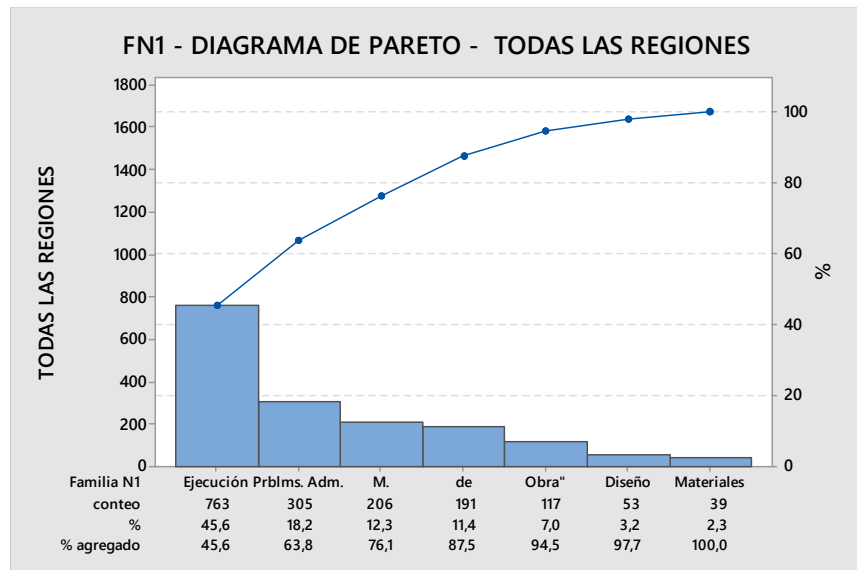


Figura 12, Diagrama de Pareto para el Grupo Nivel 1 – Global

Cuatro de las cinco regiones estudiadas revelan que el grupo de "Ejecución" es el grupo principal de causas de demora de proyectos de construcción. En segundo lugar, se ubicó el grupo "Problemas administrativos", resultando el segundo grupo en cuatro de las cinco regiones. Finalmente, el grupo "Mano de obra" ocupó el tercer lugar en cuatro de cada cinco regiones estudiadas. Independientemente de la ubicación del estudio, estos tres grupos se clasificaron en los primeros lugares para las familias Nivel I estudiadas, con una posible variación en el orden de aparición.

Asimismo, y como puede verse en la Figura 12, analizando las causas generales de la demora globales, el 76,1% de las causas de retrasos de proyectos de construcción que se mencionan en la literatura quedan comprendidas dentro de estos tres grupos. Por lo que, de aquí en adelante, el enfoque del estudio se centró en profundizar las causas de retraso que los componen a estos tres grupos Nivel I. Se realizó entonces un estudio análogo, pero para determinar las causas principales de retraso dentro de los subgrupos de Nivel 2 en los tres grupos principales de Nivel I determinados.

En la Figura 13 es posible ver que existen tres subgrupos de Nivel 2 que representan casi el 80% del total de causas de la familia Nivel I Ejecución. Esto significa que "Cambios durante la construcción", "Mala dirección de obra" y "Errores constructivos" fueron los tres subgrupos principales."

Como análisis de esta observación, se concluye que estas tres causas nivel 2 surgen a partir de imprevistos durante la etapa de ejecución. Este análisis condujo a proponer métodos de mejora centrados más en técnicas predictivas que en métodos de eliminación de la causa raíz, ya que la misma puede ser diversa y no predecible como causa tal.

La Figura 14 muestra que dentro del grupo "Problemas administrativos", casi el 80% de las causas mencionadas se refieren a los problemas económicos o financieros de un proyecto, es decir, a una mala gestión del flujo de caja. Para prevenir las fallas durante el proceso económico/financiero, se consideró de interés llevar a cabo un estudio de las tipologías de flujos de caja de los proyectos de construcción.

Finalmente, en lo que refiere al grupo de "Mano de obra", los "Conflictos/ Relaciones", la "Falta de experiencia" y la "Baja productividad" son los tres subgrupos principales que representan más del 80% de las causas mencionadas, Figura 15. En el caso del grupo "Mano de obra", dado que todas las causas son atribuibles al personal, se consideró que se necesitarían estudios adicionales sobre el comportamiento humano para determinar las causas fundamentales del conflicto y la baja productividad.

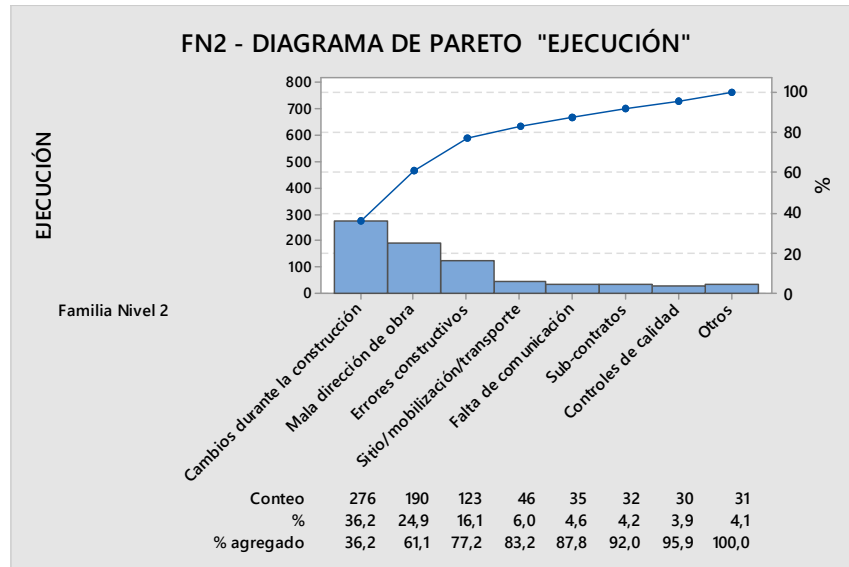


Figura 13, Diagrama de Pareto para las familias Nivel 2 dentro de la familia Nivel 1 "Ejecución"

5. Causas de retraso de los proyectos de construcción

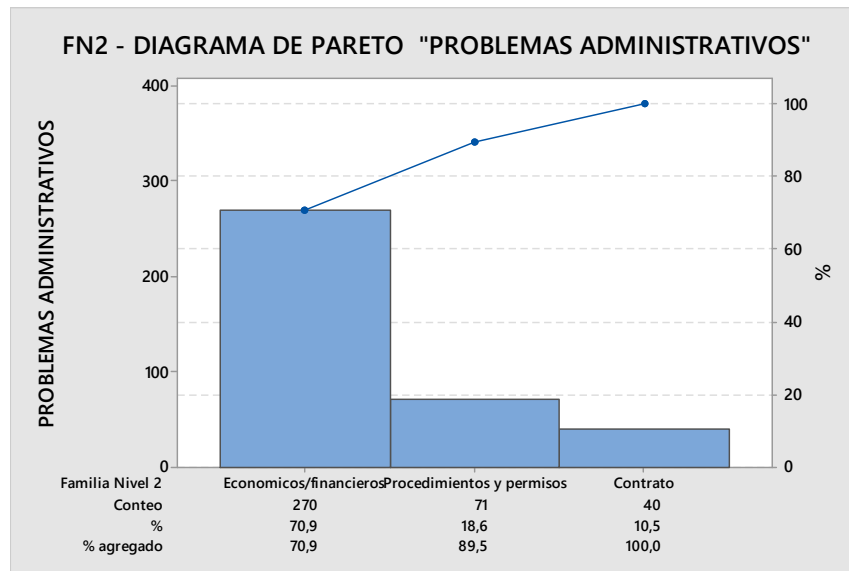


Figura 14, Diagrama de Pareto para las familias Nivel 2 dentro de la Familia Nivel 1 "Problemas administrativos"

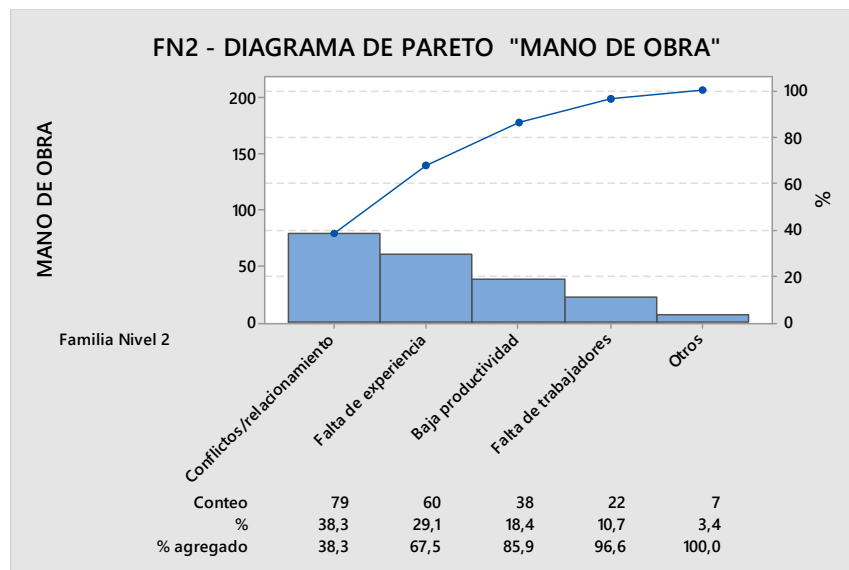


Figura 15, Diagrama de Pareto para las familias Nivel 2 dentro de la Familia Nivel 1 "Mano de obra"

### 5.3.1 CONCLUSIONES

Se han recopilado 1181 causas de retrasos de proyectos de construcción enumeradas por 47 autores diferentes que realizan análisis cuantitativos.

Para analizar y comparar las principales causas de retraso, se tuvo en cuenta el índice de impacto propuesto en los artículos estudiados. Este índice se normalizó y se generó una nueva medida de índice de impacto estandarizado. El uso del índice de impacto estandarizado como medida para determinar las causas principales de retraso en los proyectos de construcción se descartó debido a la variabilidad estadística en los datos. El uso de este método no proporciona ninguna evidencia de que uno o más grupos del Nivel 1 sean más importantes que otros, análogamente no se pudieron obtener conclusiones respecto a los grupos Nivel 2.

Dado que se descartó el uso de índices de impacto estandarizados, se decidió utilizar un método de conteo de menciones, con el fin de determinar las causas principales de retraso con menos sesgo estadístico.

Se puede concluir que las principales causas de retraso en los proyectos de construcción son los problemas que se producen durante la ejecución, los problemas administrativos y los conflictos laborales, que en conjunto representan casi el 80% de las causas mencionadas en la literatura. Además, se puede deducir que los problemas durante la ejecución se basan en eventos impredecibles, mientras que los problemas administrativos tienen su origen en una mala gestión del flujo de caja.

Se identificaron siete subgrupos de causas de retraso del Nivel 2 como importantes debido al número de menciones destacando: “Cambios durante la construcción”, “Mala dirección de obra”, “Errores constructivos”, “Problemas económicos/financieros”, “Conflicto / Relaciones” y “Falta de experiencia”.

La clasificación, cuantificación y resumen de las principales causas de demora que se enumeran en la literatura sobre demoras de proyectos de construcción pueden servir como insumos para futuras metodologías de mejora de la gestión

que tienen como objetivo reducir los costes y garantizar que se cumplan los plazos.

Estos resultados también pueden ayudar a mejorar la fase de diseño del proyecto de construcción. Gracias a la clasificación de causas los diseñadores podrán contar con herramientas para conocer cuáles son las principales causas de demoras en los proyectos de construcción y utilizar esta información como punto de partida para diseñar futuros proyectos, pudiendo minimizar los desvíos.

Además, contar con la información obtenida del estudio realizado es tanto de interés académico como práctico. Desde el punto de vista académico, permite a los investigadores saber qué causas de demora en los proyectos de construcción son las principales en un contexto global, lo que permitirá evaluar diferentes iniciativas de investigación en el área de gestión de proyectos que finalmente permitirá prevenir y ayudará a mitigar las demoras. Desde el punto de vista práctico, saber cuáles son las causas más frecuentes de demora puede ayudar a establecer planes de contingencia para resolver de manera efectiva y eficiente las posibles desviaciones del proyecto inicial planificado.

Como propuestas de mejora para las causas de retraso de los proyectos de construcción determinadas en este estudio se procederá:

1. En el caso de las causas de retraso por problemas durante la ejecución de la obra, debido a que la mayoría de las problemáticas se suelen producir por imprevistos, se procederá a desarrollar herramientas estadísticas predictivas. Estas herramientas permitirán determinar el futuro comportamiento de una obra de forma genérica conociendo su comportamiento pasado. De este modo, a pesar de no poder subsanar o proponer mejoras para los imprevistos, se contará con información fiel sobre los posibles desvíos del proyecto que permitirán tomar decisiones de forma anticipada.
  - a. Se propondrá una herramienta para la identificación de taxonomías de comportamiento de cronogramas de obra, a partir de la cual, los gestores de proyecto podrán clasificar sus obras en



los comportamientos típicos determinados. De este modo se podrá conocer a grandes rasgos el posible comportamiento futuro del proyecto.

- b. Se propondrá una herramienta estadística basada en cadenas de Markov para la predicción de comportamiento futuro basado en comportamiento pasado, que permitirá predecir con mayor precisión los volúmenes de avance del proyecto que se alcanzarán.
2. En el caso de causas debido problemas financieros, y teniendo en cuenta que la mayor parte de ellas se basa en la gestión deficiente de los flujos de caja y la mala predicción de los mismos, se construirá una herramienta estadística basada en la determinación de una taxonomía de comportamiento de estos flujos. A través de la utilización de análisis de conglomerados se determinarán los comportamientos típicos de flujos de caja. Asimismo, se buscarán los indicadores claves para clasificar nuevos proyectos en las taxonomías determinadas. De este modo, un gestor de proyecto podrá, por un lado, en la etapa de diseño programar un proyecto de construcción con tendencias al éxito; y, por otro, en la etapa de construcción, conocer cómo será el comportamiento futuro del proyecto basado en el comportamiento pasado del mismo.
3. Para el caso de las causas referentes a la mano de obra y baja productividad del personal, entendiendo que el tema de comportamiento humano se escapa a los límites del estudio en curso, se postergará el estudio para una futura etapa.



# 6. TAXONOMÍA DE LOS PROYECTOS DE CONSTRUCCIÓN EN BASE A LOS TIEMPOS DE EJECUCIÓN

---

## 6.1 INTRODUCCIÓN

Como hemos visto en el Capítulo 2, los proyectos de construcción suelen presentar retrasos o demoras que implican grandes sobrecostes, no solo para las empresas constructoras, sino para los destinatarios de las infraestructuras que se están construyendo, (Sambasivan & Wen-Soon, 2007). En el capítulo 5 se han estudiado las posibles causas de retraso de los proyectos de construcción, llegando a la conclusión que uno de los mayores problemas son los retrasos durante la etapa de ejecución de la obra.

Para evitar esta situación, el uso de un monitoreo adecuado durante la ejecución de los proyectos permite determinar la estado actual de un proyecto y posibilita hacer una predicción, con cierto grado de acierto, de su estado futuro, siempre y cuando no surjan nuevos imprevistos o se introduzcan nuevas variables, (De Marco & Narbaev, 2013).

De acuerdo con (Aristondo, 2003) y (E.C, 2007), una de las herramientas más populares y aceptadas para el monitoreo de los proyectos de construcción son los cronogramas. Un cronograma se puede definir como una lista de los hitos, actividades y entregables de un proyecto, generalmente con las fechas de inicio y finalización previstas, (PMBOK, 2004). Para el análisis de los cronogramas existen diversos métodos e indicadores que se pueden tener en cuenta, una de ellas y la seleccionada para este estudio es el análisis del valor ganado.

El análisis del valor ganado, cuya sigla es EVA por su nombre en inglés “Earned Value Analysis”, es una técnica teórica de alta aceptación para el control de proyectos, sobre todo para proyectos de construcción. El sistema de Gestión de Valor Ganado (EVM por su sigla en inglés referente a “Earned Value Management”) representa un enfoque organizado para la integración y medición de los costes y la distribución del tiempo o los logros del proyecto, (Brlecic, et al., 2016).

A diferencia de otras técnicas de gestión de proyectos que se centran principalmente en el control, EVM trasciende esta forma y proporciona información que puede predecir con mayor facilidad las tendencias futuras de comportamiento de un proyecto, (Norman, et al., 2008).

Según (Lipke, 2003), EVM es una técnica para controlar el desempeño de un proyecto al comparar la cantidad de trabajo hasta un momento determinado con las estimaciones realizadas antes del inicio del proyecto. De esta manera, hay una medida de la cantidad de trabajo realizado y la cantidad de trabajo restante para lograr la finalización del proyecto.

La técnica EVM tiene sus raíces en el Project Management Institute y mide el progreso de un proyecto de manera objetiva proporcionando una alerta temprana de problemas de rendimiento deficiente, en el caso que los haya, (PMBOK, 2004). Está ampliamente aceptado y bien documentado que la implementación de EVM aporta un valor agregado al esquema de monitoreo de proyectos, especialmente en proyectos de construcción, (Abba & Niel, 2010), (Anbari, 2003), (Blanco, 2003), (Bruke, 2003), (Cioffi, 2006), (Jacob, 2006), (Kim, et al., 2003), (Lipke, 2002) y (McKim, et al., 2000).

En la práctica para el uso de la metodología EVM, el desempeño del proyecto se evalúa comparando los índices del valor ganado o el avance físico real del proyecto (EV por su sigla en inglés Earned Value) con las estimaciones o predicciones realizadas a través del uso de indicadores de desempeño pasados, con proyectos similares o con otros criterios propuestos por la literatura, (Aliverdi, et al., 2013).

Para la aplicación de EVM es necesario establecer una serie de conceptos que ayuden a la determinación de los indicadores principales propuestos por esta metodología. En EVM se define como Valor Planificado (PV) al valor (en tiempo) previsto al comienzo del proyecto, es decir, que PV se refiere al cronograma de contrato previsto al inicio de la obra. Por otro lado, el Valor Ganado (también en tiempo) (EV) se refiere al valor real ejecutado, comparable con el cronograma de ejecución de una obra.

A modo de ejemplo, una obra de construcción civil ha planeado en sus inicios culminar los trabajos en un plazo de 36 meses (plazo contractual), pero debido a demoras y retrasos que se han producido, ha culminado sus tareas y finalizado la obra en un plazo de 40 meses. De este modo se define que el PV de la obra es 36 meses y el EV de la misma es de 40 meses.

A partir de estos conceptos, la metodología EVM propone entonces dos indicadores claves para la determinación de la eficiencia de cronogramas y la detección de atrasos de obra: Variación del cronograma (SV por su sigla en inglés Schedule Variation) y el índice de rendimiento del cronograma (SPI por su sigla en inglés Schedule Performance Index).

El indicador SV determina si un proyecto está atrasado o adelantado, relacionando los parámetros EV y PV a través de la Ecuación (33). Mientras que el indicador SV sea menor a cero, se puede decir que el avance de la obra se encuentra dentro de lo programado, por el contrario, se tendrá una condición desfavorable de proyecto cuando este indicador es mayor a cero, (Lipke, 2003).

$$SV = EV - PV \quad (33)$$

Por otro lado, el indicador SPI, Ecuación (34), es una medida de qué tan bien está avanzando el trabajo respecto del cronograma planificado. Si el resultado es menor que 1, indica que el proyecto está adelantado en el cronograma, mientras que un resultado mayor a 1 se puede decir que la obra estudiada presenta retrasos.

$$SPI = \frac{EV}{PV} \quad (34)$$

Finalmente, el concepto de Valor Ganado (ES) es una extensión del EVM. Este concepto mide el tiempo adicional que una obra requiere para alcanzar el avance previsto (en caso de que la misma se encuentre atrasada). En el caso que la obra se encuentre adelantada a su cronograma previsto se puede definir como el intervalo de tiempo en que la obra se puede mantener sin progresar para que esto no genere un atraso en el cronograma, Ecuación (35). El indicador ES es utilizado, en general, para la determinación de la eficiencia de cronogramas de obra. A modo de ejemplo, (Lipke, 2003) realizó un estudio con datos reales de 16 obras Estadounidenses, mientras que otros autores han aplicado la metodología y demostrando su eficiencia (Fleming & Koppelman, 2010), (Vanhoucke, 2010) y (Vanhoucke M., 2014).

$$ES = \frac{EV - PV}{PV} \quad (35)$$

En la Figura 16 puede ver el resumen de los 3 indicadores de control del desempeño de una obra que propone EVM.

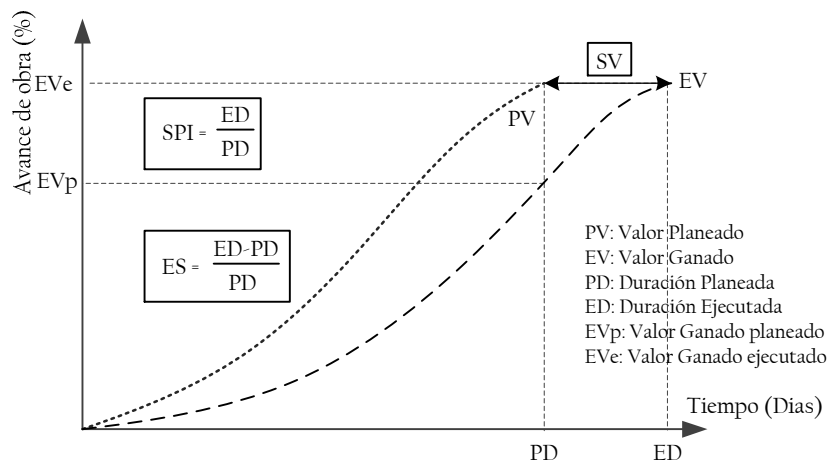


Figura 16, Indicadores EVM y ES para caracterización del comportamiento de una obra

Los indicadores de EVM y el indicador ES serán utilizados en este apartado con el objetivo de validar las taxonomías obtenidas mediante el uso de análisis de conglomerados.

## 6.2 METODOLOGÍA

En este capítulo se va analizar el comportamiento de cronogramas de proyectos de construcción a partir de la información recogida en sus cronogramas. El objetivo de este capítulo es definir los comportamientos típicos de los proyectos de construcción en base a sus tiempos de ejecución.

Conocer los comportamientos típicos tendenciales de los proyectos de construcción permitirá a los gestores tener una idea de cómo avanzará su proyecto, pudiendo tomar medidas preventivas ante posibles desviaciones.

### 6.2.1 CARACTERIZACIÓN DE LA MUESTRA

La base de datos que fue utilizada para estudiar el comportamiento de cronogramas de proyectos de construcción incluyó 90 proyectos de viviendas en Uruguay. Para cada proyecto se disponía del cronograma planificado y el cronograma obtenido. Esto permitió determinar los índices EVM mediante el uso de la Ecuación (33), Ecuación (34) y Ecuación (35). Con esta base de datos se generó una taxonomía que clasifica los proyectos de construcción de acuerdo a sus tiempos de ejecución.

Para validar la taxonomía encontrada se utilizó una base de datos de 15 proyectos de construcción españoles. Adicionalmente, se recopilaron de la literatura existente datos de proyectos de construcción que fueron utilizados conjuntamente para la fase de validación.

Algunos autores como (Senoucia, et al., 2016), (Vandervoorde & Vanhoucke, 2006), (Guo, et al., 2016), (Araszkiewicz, 2017), (Sabaté, 2012), (Callahan, et al., 1992) y (Hernandez & Loayza, 2013) mencionan datos relativos al desempeño de proyectos de construcción utilizados en sus estudios. Estos datos fueron posteriormente utilizados para una doble validación de los resultados obtenidos.

## 6. Taxonomía de los proyectos de construcción en base a los tiempos de ejecución

Dado que no todos los proyectos de construcción que se analizaron tenían el mismo tiempo previsto de obra (PV), para poder comparar los tiempos de ejecución de los proyectos se decidió discretizar los valores del tiempo (eje de las abscisas) tomando como criterio la división del tiempo previsto de obra en 10 partes iguales, Figura 17. De esta manera, se consigue hacer comparables los valores de avance entre dos proyectos de construcción que no tienen la misma duración, dado que se compara el porcentaje de avance a una porción determinada del tiempo total previsto de obra.

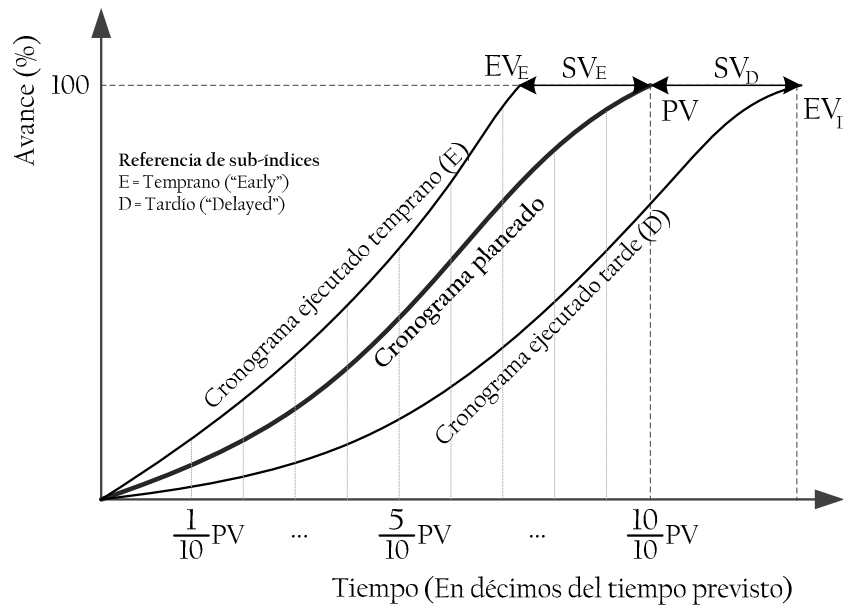


Figura 17, Índices EVM y ES para caracterización del comportamiento de proyectos de construcción.

Para la creación de la taxonomía, tanto la base de datos de 90 proyectos de construcción uruguayos, la base de datos de 15 proyectos de construcción



españoles y los cronogramas encontrados en la literatura fueron convertidos a la escala mencionada y los indicadores de EVM y ES fueron calculados.

### 6.2.2 ANÁLISIS DE CONGLOMERADO

Como se describió en el capítulo de metodología, el análisis de conglomerados o análisis clúster, es una técnica multivariante utilizada para clasificar un conjunto de individuos o elementos en grupos homogéneos. Este tipo de análisis se usa a menudo para determinar taxonomías o comportamientos de grupos similares, (Hair, et al., 2004).

La determinación de una taxonomía del comportamiento de cronogramas de proyectos de construcción permitirá comparar un nuevo proyecto de obra con los comportamientos típicos determinados. Si es posible determinar en un espacio de tiempo razonable en qué grupo de comportamiento se clasifica el nuevo proyecto. Esta taxonomía permitiría a los gerentes de los proyectos actuar y tomar decisiones según las tendencias que cada proyecto muestra.

Para la ejecución de un análisis clúster, la selección de las variables de agrupación juega un papel fundamental en los resultados obtenidos. Consideraciones conceptuales y prácticas deben ser tenidas en cuenta y únicamente variables que se relacionan específicamente con el objeto de análisis deben ser incluidas en el estudio.

El proceso completo de análisis se estructurará de acuerdo con el siguiente esquema:

1. Se parte de un conjunto de  $N$  individuos o ítems de los que se dispone de una información cifrada por un conjunto de  $n$  variables (en este caso, los individuos se corresponden con 90 obras de construcciones de viviendas de la base de datos uruguaya con 11 variables a medir, sus valores de avance porcentual en cada décimo de obra y el indicador ES que mide la proporción de atraso con respecto al cronograma original).

2. Se establece un criterio de similitud que permitirá relacionar la semejanza de los 90 proyectos entre sí. En este caso, se tendrán en cuenta los indicadores de EVM descritos anteriormente.
3. Se selecciona un método de clasificación para determinar la estructura de la agrupación de los individuos, en este caso particular se utilizará el método de la distancia máxima (furthest neighbour o complete linkage) midiendo la distancia euclídeana.
4. Finalmente se especifica la estructura obtenida mediante diagramas arbóreos o dendrogramas.

Para clasificar adecuadamente los individuos o ítems analizados se debe determinar lo similares o disimilares que son entre sí, en función de lo diferentes que resulten ser sus representaciones en el espacio de las variables seleccionadas. La mayor parte de los índices de similitud son indicadores basados en la distancia. Se da el nombre de distancia entre dos individuos o ítems  $i$  y  $j$  a una medida, indicada por  $d(i, j)$ , que mide el grado de semejanza entre ambos objetos. El valor de  $d(i, j)$ , es siempre un valor no negativo y cuanto mayor sea este valor mayor será la diferencia.

En este caso, si se representan a los ítems de estudio como vectores en el espacio de las variables,  $C_1 \dots C_i \dots C_{90}$ , entonces cada vector incluirá los valores de avances porcentuales en cada décimo:  $\frac{m}{10}t$  (dónde  $m$  indica el número del décimo) e incluirá adicionalmente el valor del indicador ES que proporciona la medida del grado de retraso porcentual con respecto al cronograma previsto, pudiendo así caracterizar completamente una obra mediante el vector de la Ecuación (36).

$$C_i = \left( \frac{1}{10}t, \frac{2}{10}t, \frac{3}{10}t, \dots, \frac{8}{10}t, \frac{9}{10}t, \frac{10}{10}t, ES \right) \quad (36)$$

La distancia Euclídiana  $d(i, j)$  queda determinada entonces por la diferencia vectorial entre los vectores  $C_i - C_j$ , Ecuación (37), (Scott & Knott, 1974).

$$d_{c_i;c_j} = \sqrt{(x_{c_j} - x_{c_i})^2 + (y_{c_j} - y_{c_i})^2} \quad (37)$$

En lo que refiere a los métodos de clasificación, existen diversas opciones y modelos dentro de los que se encuentran los métodos jerárquicos, métodos de optimización, métodos de densidad (o mode-seeking), métodos "clumping" (o de partición), entre otros.

Los métodos jerárquicos son los que han sido los más reconocidos y trabajados, (Dillon & Goldstein, 1984), razón por la cual serán utilizados dentro de ésta investigación. En los métodos jerárquicos los ítems no se particionan en clústers de una sola vez, sino que se realizan particiones sucesivas a distintos niveles de agregación o agrupamiento.

En esta investigación se utilizará el método de clasificación "complete linkage". Este método considera que la distancia o similitud entre dos clústers debe ser medida atendiendo a sus elementos más dispares, ósea que la distancia entre dos clústers viene dada por la máxima distancia (o mínima similitud) entre sus componentes, tal y como se explicó en el capítulo de metodología.

### 6.2.3 FASE DE VALIDACIÓN

Una vez obtenida a partir de la muestra inicial de proyectos la clasificación deseada, aquella que determina los comportamientos típicos de los proyectos de construcción, ésta se validó a través del uso de las bases de datos de proyectos de construcción españoles y los recopilados de la literatura. La validación consistió en comprobar si era posible clasificar la pertenencia de las bases de datos de validación en los conglomerados previamente obtenidos.

Para ello fue necesario determinar un método de clasificación de nuevos proyectos en la taxonomía determinada. Para ello se utilizó el método de regresión lineal con el mejor ajuste a grupos. Es decir, se estudiaron estadísticamente todos los décimos de los conglomerados obtenidos buscando conocer cuál o cuáles de ellos tenían más influencia en la predicción de la variable de interés (o variable respuesta), en este caso, en el indicador ES. De este modo, utilizando únicamente los indicadores de mayor influencia en el retraso total, se

podría llegar a clasificar nuevos proyectos en los clústeres previamente determinados.

En las técnicas de regresión existen diversas metodologías que sirven para ayudar a identificar cuál es el mejor ajuste entre la variable respuesta y las variables predictivas. Una de ellas es la denominada mejor modelo de subconjuntos.

Se trata de identificar los subconjuntos de variables predictores que proporcionan un mejor ajuste en términos de error cuadrático medio. La regresión de los mejores subconjuntos es una forma eficiente de identificar modelos que se ajustan a los datos de manera adecuada y utilizando la menor cantidad posible de predictores.

La herramienta de mejor ajuste se usa en estudios de regresión múltiple para encontrar el subconjunto de variables predictores que mejor expliquen la variabilidad de la respuesta a través de su relación lineal con ésta; para este caso, se buscó conocer qué décimo o combinación de décimos producía el mejor ajuste lineal en el indicador ES.

Una vez obtenidos los predictores que mejor se ajustan (uno o más de los elementos  $C_i$ ), se estudiaron sus intervalos de confianza para verificar la disimilitud estadística entre los principales predictores de los grupos que pudieran garantizar que el método de validación utilizado era confiable. En el caso de que la combinación de predictores diera como resultado intervalos de confianza estadísticamente similares, se buscaría la mejor combinación siguiente que proporcione disimilitud.

Posteriormente, las bases de datos de proyectos de construcción española y bibliográfica se compararon con los conglomerados obtenidos teniendo en cuenta los factores predictivos clave que fueron determinados a través de la regresión lineal. De esta manera, un proyecto de construcción pertenece a un conglomerado cuando todos sus predictores principales se encuentren en el intervalo de confianza del 95% de ese conglomerado. Habiendo demostrado previamente la disimilitud entre los datos de los principales predictores, cuando

un proyecto pertenece a un grupo, estadísticamente se puede decir que no pertenece a ningún otro.

Después de que ambas bases de datos de validación fueron clasificadas en los diferentes grupos, se midió el valor absoluto de la diferencia entre el retraso promedio del grupo (centroide ES para cada grupo) y el retraso de cada uno de los proyectos que pertenecen a él. El promedio de todas las diferencias encontradas representa la precisión media que proporciona el método propuesto para predecir desviaciones de los cronogramas.

### 6.3 CARACTERIZACIÓN DE LAS BASES DE DATOS

Se procesaron los 90 proyectos de construcción de la base de datos uruguaya. La base se encuentra compuesta por proyectos de construcción de viviendas, en su mayoría edificaciones en altura y todas de ellas realizadas mediante sistemas de construcción tradicional. La Tabla 2 y la Tabla 3 muestran el avance físico del proyecto de construcción promedio para cada uno de los décimos del tiempo previsto y los promedios de los indicadores ES y EVM. En ambas tablas se puede ver los valores del promedio, de la desviación standard SD, de los límites de los intervalos e confianza al 95% (ICS límite de confianza superior y ICI límite de confianza interior) y los valores máximos y mínimos de la base de datos.

Estos datos permiten construir las curvas características del progreso de los proyectos de construcción, dado que contienen todos los datos necesarios para graficarla. Del análisis de la base de datos se puede deducir que los proyectos de construcción muestran un retraso promedio de 34.68% con un intervalo de confianza del 95% que incluye retrasos que van desde 28.95% a 40.41%.

## 6. Taxonomía de los proyectos de construcción en base a los tiempos de ejecución

Tabla 2, Valores de la base de datos de 90 proyectos de construcción uruguayos en décimos de tiempo previsto

Décimos PV	Media	SD	ICS	ICI	Max	Min
1/10t%	5,50	4,17	6,36	4,64	17,62	0,00
2/10t%	7,69	3,48	8,41	6,97	20,00	0,72
3/10t%	8,10	3,46	8,82	7,39	20,42	2,08
4/10t%	8,34	3,15	9,00	7,69	16,34	0,00
5/10t%	8,72	3,48	9,44	8,00	18,00	0,88
6/10t%	9,49	3,80	10,27	8,70	30,13	3,01
7/10t%	9,50	3,53	10,23	8,77	20,13	2,51
8/10t%	9,23	3,39	9,93	8,53	21,23	3,32
9/10t%	8,98	3,67	9,74	8,22	24,17	0,01
10/10t%	8,12	3,67	8,88	7,36	16,27	0,00

Tabla 3, Valores de indicadores EVM y ES para la base de datos de 90 proyectos de construcción uruguayos

EVM/ES	Media	SD	ICS	ICI	Max	Min
ES%	34,68	27,74	40,41	29,95	120,00	-6,25
SV%	8,21	6,41	9,54	6,89	26,00	-2,00
SPI	1,35	0,28	1,40	1,29	2,20	0,94

La Tabla 4 y la Tabla 5 muestran el proceso análogo de caracterización para las 15 obras españolas que serán utilizadas durante la etapa de validación. Por otro lado, la Tabla 6 y la Tabla 7 muestran la caracterización de la base de datos de los proyectos de construcción extraídos de la literatura. Los datos publicados por (Sabaté, 2012), (Callahan, et al., 1992) y (Hernandez & Loayza, 2013) se transformaron utilizando el sistema de décimos explicado, de modo que son comparables con las bases de datos.

Tabla 4, Valores de la base de datos de 15 proyectos de construcción españoles en décimos de tiempo previsto

Décimos PV	Media	SD	ICS	ICI	Max	Min
1/10t%	5,69	2,06	6,73	4,64	10,51	2,85
2/10t%	7,15	1,96	8,15	6,16	10,41	2,89
3/10t%	8,45	1,89	9,40	7,49	10,98	4,98
4/10t%	8,55	1,64	9,38	7,72	11,21	5,44
5/10t%	8,82	1,94	9,80	7,84	11,83	4,08
6/10t%	9,60	1,61	10,42	8,79	13,09	6,89
7/10t%	9,79	1,75	10,68	8,90	13,13	6,36
8/10t%	9,29	1,58	10,09	8,49	13,11	6,93
9/10t%	8,96	1,83	9,89	8,04	10,94	4,22
10/10t%	7,37	2,36	8,56	6,17	10,36	3,01

## 6. Taxonomía de los proyectos de construcción en base a su tiempo de ejecución

Tabla 5, Valores de indicadores EVM y ES para la base de datos de 15 proyectos de construcción españoles

EVM/ES	Media	SD	ICS	ICI	Max	Min
ES%	30,24	23,65	42,21	18,27	30,24	23,7
SV%	6,60	4,97	9,11	4,09	6,60	4,97
SPI	1,30	0,24	1,42	1,18	1,30	0,24

Tabla 6, Valores de la base de datos extraída de la literatura en décimos de tiempo previsto

Décimos PV	Media	SD	ICS	ICI	Max	Min
1/10t%	6,06	1,12	7,15	4,97	7,23	4,73
2/10t%	7,65	0,58	8,22	7,08	8,32	6,90
3/10t%	8,53	0,51	9,02	8,03	8,96	7,90
4/10t%	8,75	0,50	9,24	8,25	9,23	8,09
5/10t%	8,47	1,52	9,96	6,98	9,96	6,45
6/10t%	9,20	0,33	9,52	8,88	9,63	8,93
7/10t%	8,89	0,62	9,49	8,28	9,37	8,03
8/10t%	9,04	1,14	10,15	7,93	10,57	8,02
9/10t%	9,53	1,63	11,13	7,93	11,20	7,36
10/10t%	8,56	0,64	9,18	7,93	9,16	7,98

Tabla 7, Valores de indicadores EVM y ES para la base de datos extraída de la literatura

EVM/ES	Media	SD	ICS	ICI	Max	Min
ES%	21,88	9,24	30,93	12,82	21,88	9,24
SV%	5,00	2,71	7,65	2,35	7,00	1,00
SPI	1,22	0,09	1,31	1,13	1,29	1,08

Los datos que se recogieron en las bases de datos españolas, uruguayas y de la literatura no difieren en gran medida en sus valores medios. Sin embargo, la diferencia se hace más evidente cuando se contrarrestan los datos referentes a los tiempos de finalización, en donde se puede ver que los proyectos uruguayos tienden a mostrar mayores retrasos que sus contrapartes, la base de datos de la literatura es la que presenta el tiempo de finalización promedio más corto.

### 6.4 TAXONOMÍA OBTENIDA

Se realizó el análisis de conglomerados a la base de datos de proyectos de construcción uruguayos. La Tabla 8, Tabla 9 y Tabla 10 muestran el proceso de agrupación y se puede apreciar como la combinación de 4 conglomerados o

clústeres proporciona la mejor opción. Asimismo en la Figura 18 se muestra gráficamente el proceso de agrupación. Los centroides de los conglomerados obtenidos se muestran en la Tabla 11 y Tabla 12.

Para valorar la disimilitud entre los 4 clúster formados se realizó un análisis ANOVA para las variables de control SV y SPI. Las diferencias significativas detectadas para éstos indicadores fueron analizadas más en detalle con la construcción de los intervalos de confianza para las diferencias de medias mediante dos métodos distintos, método Tukey y el método Fisher. La Figura 19<sup>a</sup> Figura 19a y Figura 19b muestran las diferencias entre intervalos para ambos indicadores EVM. Los datos de Tabla 11 y Tabla 12 se representan gráficamente en la Figura 20, en dónde se pueden ver los 4 comportamientos tipo de las obras de la base de datos de 90 proyectos de construcción uruguayos.

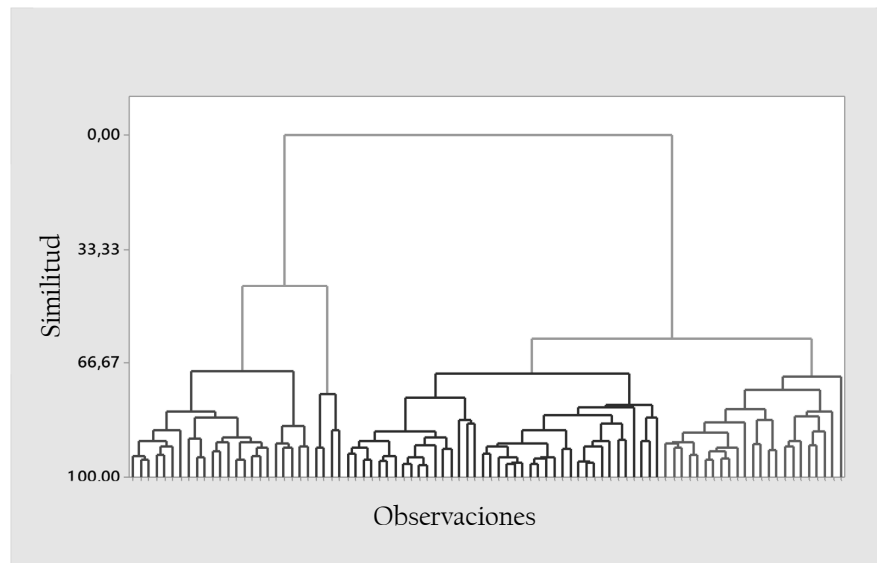


Figura 18, Dendrograma de similitudes utilizando método de distancia máxima

Los conglomerados 3 y 4 presentan la mayor diferencia entre sí, pudiéndose observar que existen obras de construcciones que comienzan con un avance mayor al 6% en su primer décimo y que se mantienen con un avance promedio en cada décimo de más de 9%, finalizándose con un atraso menor al 6% (clúster 3);



6. Taxonomía de los proyectos de construcción en base a su tiempo de ejecución

mientras que las obras que sufren el mayor retraso final comienzan con avances menores a 5% en su primer décimo y alcanzan avances medios de entre 63 a 71% al llegar al décimo número 10 (clúster 1 y 4).

La diferencia principal entre los conglomerados 1 y 4 son el tiempo de recuperación del retraso, las obras del clúster 1 logran recuperar el atraso en un 64,57% del tiempo originalmente previsto, mientras que las obras del clúster 4 sufren mayores problemas en la gestión y alcanzan el 100% de su avance en un poco más del doble del tiempo que se previó originalmente. Finalmente, las obras del clúster 2 presentan un comportamiento medio entre ambos extremos, con valores de avances medios en los décimos de 8,53% y finalizando con un atraso medio de 27,08%.

Tabla 8, Proceso de aglomeramiento para la base de datos de 90 proyectos, parte 1

N° de Pasos	N° de Clústers	Nivel de similitud	Distancia	Clústers Unidos		Nuevo cluster	N° de obs nuev. Clus.
1	89	96,56	4,37	20	41	20	2
2	88	96,25	4,77	39	47	39	2
3	87	96,17	4,87	7	83	7	2
4	86	96,16	4,88	19	54	19	2
5	85	95,86	5,26	39	69	39	3
6	84	95,80	5,34	25	28	25	2
7	83	95,47	5,76	9	25	9	3
8	82	95,34	5,92	30	43	30	2
9	81	95,03	6,31	44	46	44	2
10	80	95,00	6,35	70	72	70	2
11	79	94,91	6,47	13	76	13	2
12	78	94,86	6,53	18	68	18	2
13	77	94,51	6,97	19	61	19	3
14	76	94,46	7,04	33	48	33	2
15	75	94,20	7,37	19	90	19	4
16	74	94,19	7,38	7	20	7	4
17	73	94,14	7,44	38	39	38	4
18	72	94,07	7,54	11	63	11	2
19	71	94,04	7,58	1	44	1	3
20	70	93,98	7,66	30	31	30	3
21	69	93,97	7,66	40	45	40	2
22	68	93,60	8,14	29	85	29	2
23	67	93,41	8,38	55	73	55	2

6. Taxonomía de los proyectos de construcción en base a los tiempos de ejecución

Tabla 9. Proceso de aglomeramiento para la base de datos de 90 proyectos, parte 2

N° de Pasos	N° de Clústers	Nivel de similitud	Distancia	Clústers Unidos		Nuevo cluster	N° de obs nuev. Clus.
24	66	93,20	8,64	3	67	3	2
25	65	93,17	8,68	4	59	4	2
26	64	92,53	9,49	13	33	13	4
27	63	92,39	9,67	15	17	15	2
28	62	92,03	10,13	79	81	79	2
29	61	91,77	10,46	35	50	35	2
30	60	91,73	10,51	23	80	23	2
31	59	91,59	10,68	40	52	40	3
32	58	91,58	10,70	8	24	8	2
33	57	91,56	10,72	56	64	56	2
34	56	91,39	10,94	13	26	13	5
35	55	91,39	10,94	3	70	3	4
36	54	91,37	10,97	84	88	84	2
37	53	91,29	11,06	9	16	9	4
38	52	91,17	11,22	55	87	55	3
39	51	91,16	11,23	10	36	10	2
40	50	91,11	11,30	42	60	42	2
41	49	91,09	11,32	4	38	4	6
42	48	90,92	11,54	7	27	7	5
43	47	90,81	11,68	71	82	71	2
44	46	90,34	12,27	22	49	22	2
45	45	90,21	12,44	14	56	14	3
46	44	90,16	12,50	4	19	4	10
47	43	90,11	12,57	5	84	5	3
48	42	89,87	12,87	18	40	18	5
49	41	89,76	13,02	5	29	5	5
50	40	89,64	13,16	15	32	15	3
51	39	89,57	13,25	3	30	3	7
52	38	89,53	13,31	9	86	9	5
53	37	89,35	13,54	12	78	12	2
54	36	89,34	13,55	10	62	10	3
55	35	89,31	13,58	1	55	1	6
56	34	89,24	13,68	65	66	65	2
57	33	88,80	14,24	2	11	2	3
58	32	88,60	14,49	15	18	15	8
59	31	88,44	14,69	7	23	7	7
60	30	87,06	16,44	5	13	5	10
61	29	86,92	16,63	71	89	71	3
62	28	86,64	16,98	3	7	3	14
63	27	86,51	17,14	51	57	51	2

6. Taxonomía de los proyectos de construcción en base a su tiempo de ejecución

Tabla 10, Proceso de aglomeramiento para la base de datos de 90 proyectos, parte 3

N° de Pasos	N° de Clústers	Nivel de similitud	Distancia	Clústers Unidos		Nuevo cluster	N° de obs nuev. Clus.
64	26	86,26	17,46	1	37	1	7
65	25	86,24	17,48	4	35	4	12
66	24	85,09	18,94	14	42	14	5
67	23	84,44	19,77	9	65	9	7
68	22	84,35	19,88	58	75	58	2
69	21	84,05	20,27	5	74	5	11
70	20	83,48	20,99	6	58	6	3
71	19	83,40	21,09	22	79	22	4
72	18	82,69	22,00	2	15	2	11
73	17	82,64	22,06	12	34	12	3
74	16	82,45	22,29	10	71	10	6
75	15	81,89	23,01	4	9	4	19
76	14	81,12	23,99	1	2	1	18
77	13	81,09	24,03	10	53	10	7
78	12	80,32	25,00	5	22	5	15
79	11	79,49	26,06	4	77	4	20
80	10	79,08	26,58	4	12	4	23
81	9	76,83	29,44	3	6	3	17
82	8	75,74	30,82	8	51	8	4
83	7	74,41	32,52	5	10	5	22
84	6	70,86	37,03	5	21	5	23
85	5	69,71	38,49	3	4	3	40
86	4	69,21	39,13	1	14	1	23
87	3	59,63	51,30	3	5	3	63
88	2	43,82	71,39	1	8	1	27
89	1	0,00	127,06	1	3	1	90

Tabla 11, Centroides y límites de confianza para los conglomerados C1 y C2 obtenidos

Variables	C1	C1 LCS	C1 LCI	C2	C2 LCS	C2 LCI
1/10t%	4,32	5,90	2,75	5,57	6,93	4,21
2/10t%	5,84	6,70	4,97	7,83	8,84	6,82
3/10t%	5,25	5,97	4,54	7,53	9,36	5,69
4/10t%	6,03	6,81	4,24	8,57	9,25	6,81
5/10t%	7,09	8,03	6,15	8,42	9,43	7,40
6/10t%	7,72	8,53	6,42	9,68	10,77	8,51
7/10t%	8,76	10,09	7,43	8,90	9,83	7,98
8/10t%	8,29	9,43	7,15	8,79	9,59	7,99
9/10t%	8,73	10,09	7,38	10,03	11,22	8,84
10/10t%	9,17	10,36	7,98	8,96	10,00	7,92
ES %	64,57	68,31	60,74	27,08	29,44	24,55

6. Taxonomía de los proyectos de construcción en base a los tiempos de ejecución

Tabla 12, Centroides y límites de confianza para los conglomerados C3 y C4 obtenidos

Variables	C3	C3 LCS	C3 LCI	C4	C4 LCS	C4 LCI
1/10t%	6,75	8,40	5,11	5,57	7,86	0,97
2/10t%	9,77	11,33	8,20	7,83	8,81	1,43
3/10t%	10,50	12,12	9,87	4,53	4,73	3,30
4/10t%	10,44	12,03	9,85	3,57	4,47	3,35
5/10t%	10,95	12,59	9,31	8,42	9,87	6,64
6/10t%	11,09	13,19	11,00	5,68	6,48	4,50
7/10t%	11,40	13,12	9,68	8,90	11,73	5,80
8/10t%	11,34	13,14	9,54	8,79	9,20	4,61
9/10t%	8,21	9,51	6,91	4,37	6,42	2,31
10/10t%	6,49	8,09	4,88	3,02	5,29	0,74
ES %	5,70	7,98	3,32	106,74	118,45	95,02

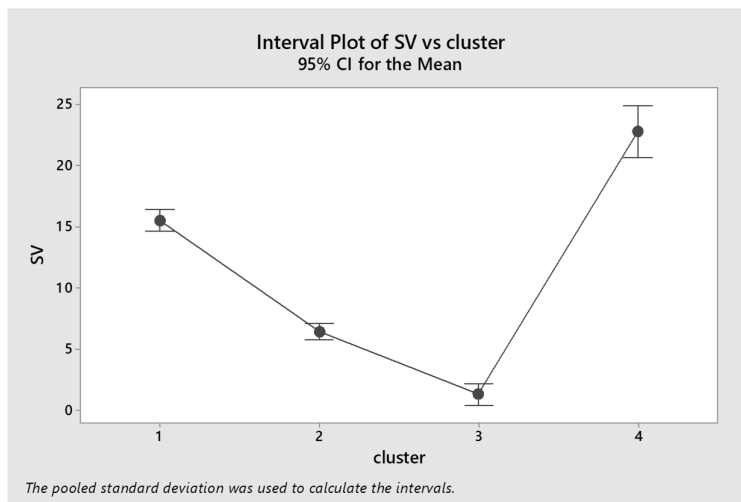


Figura 19a, Verificación de disimilitud de las variables de control para los 4 clústers obtenidos (SV)

6. Taxonomía de los proyectos de construcción en base a su tiempo de ejecución

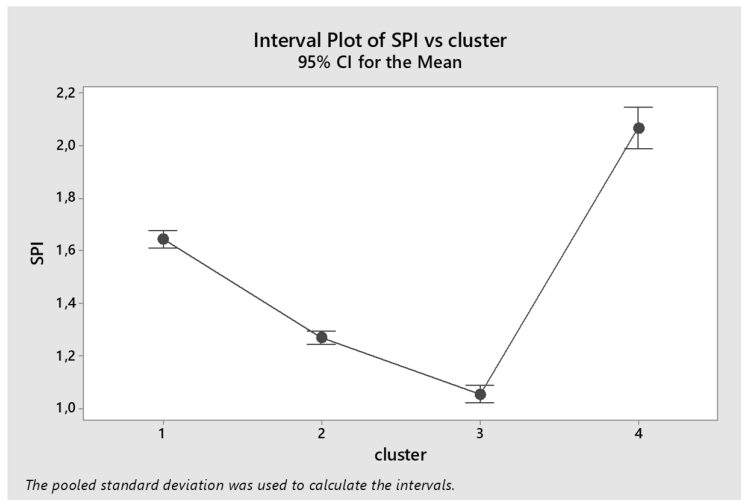


Figura 19b, Verificación de disimilitud de las variables de control para los 4 clústers obtenidos (SPI)

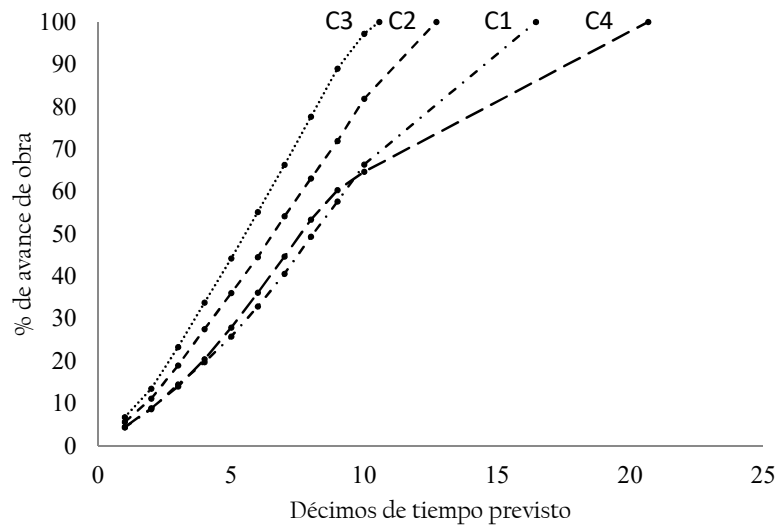


Figura 20, Comportamientos tipo de proyectos de construcción en base a 90 proyectos uruguayos

## 6.5 MÉTRICAS PARA CLASIFICAR NUEVOS PROYECTOS

La fase de validación de la taxonomía conseguida consistió en determinar qué tan apropiados son los conglomerados obtenidos para ser utilizados como métodos predictivos de clasificación de nuevos proyectos. Para ello se eligió un método para clasificar los nuevos proyectos en los grupos propuestos. Posteriormente se calculó el grado en que los grupos se ajustan a las bases de datos de validación.

Después de un análisis exhaustivo de la base de datos de proyectos de construcción uruguayos, se concluyó que, en esta base de datos, no todos los décimos tienen la misma capacidad predictiva de ES. Esto se reafirma en la Figura 20, donde se puede ver que los centroides tienen un comportamiento similar al inicio de los proyectos, separando su comportamiento solo una vez que ha transcurrido el 30% del tiempo planificado. Es por esta razón que se buscó determinar cuál de los décimos podría tener una mejor capacidad de predicción en la respuesta de ES.

Los décimos que mejor se ajustan a la variable respuesta ES se obtuvo utilizando el método de los mejores subconjuntos. La Tabla 13 muestra todas las combinaciones para los predictores  $C_i$  y el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) del modelo predictivo que se obtiene al usar cada combinación.

La mejor combinación de tres predictores se seleccionó por las siguientes razones:

- Contiene el menor número de predictores que obtienen el mayor  $R^2$
- Todos los predictores se encuentran en las fases iniciales del proyecto, lo que permitirá predicciones en etapas tempranas.
- En la combinación seleccionada (fila 5, Tabla 13), el porcentaje de la variación de datos de ES que se explica por el valor de los predictores  $C_i$  es 75,19% ( $R^2$ ).

6. Taxonomía de los proyectos de construcción en base a su tiempo de ejecución

Tabla 13, Regresión de los mejores subconjuntos – posibles combinaciones

R <sup>2</sup>	1/10t	2/10t	3/10t	4/10t	5/10t	6/10t	7/10t	8/10t	9/10t	10/10t
58,78			X							
54,19				X						
65,88				X		X				
62,54			X					X		
75,19			X	X		X				
74,77			X	X				X		
81,12			X	X		X		X		
77,89			X	X				X	X	
86,74			X	X		X		X		X
82,43		X	X	X				X	X	
90,21			X	X		X		X	X	X
88,13		X	X	X		X		X		X
93,13		X	X	X		X		X	X	X
91,46	X		X	X		X		X	X	X
94,38		X	X	X	X	X		X	X	X
94,10	X	X	X	X		X		X	X	X
95,63	X	X	X	X	X	X		X	X	X
94,52	X	X	X	X		X	X	X	X	X
95,77	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X

Después de seleccionar la mejor combinación de variables predictores, se realizó un análisis de medias. El análisis de medias se usa comúnmente para determinar si la media de cada grupo difiere de la media general. Usando este análisis estadístico, fue posible demostrar que los mejores subconjuntos que se seleccionaron son estadísticamente diferentes en cada grupo o clúster. Esto se puede ver representado en la Figura 21, Figura 22 y Figura 23.

6. Taxonomía de los proyectos de construcción en base a los tiempos de ejecución

---

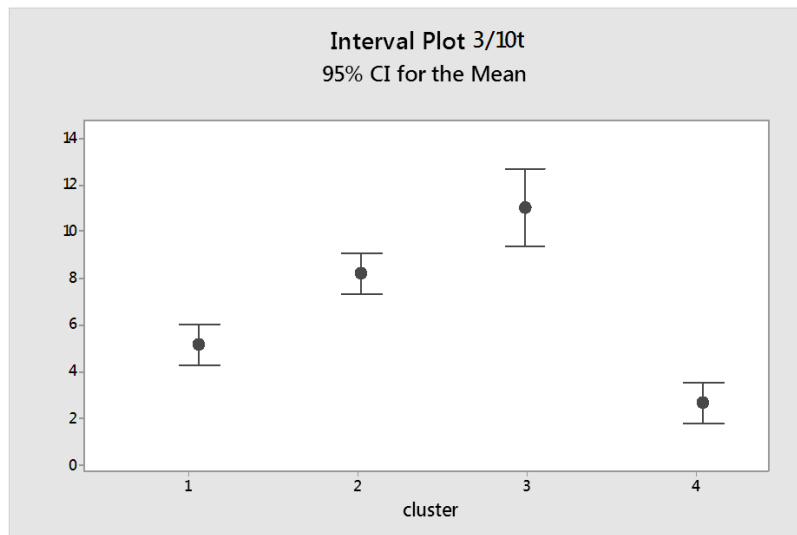


Figura 21, Intervalos de confianza para el décimo 3/10t de la base de datos uruguaya

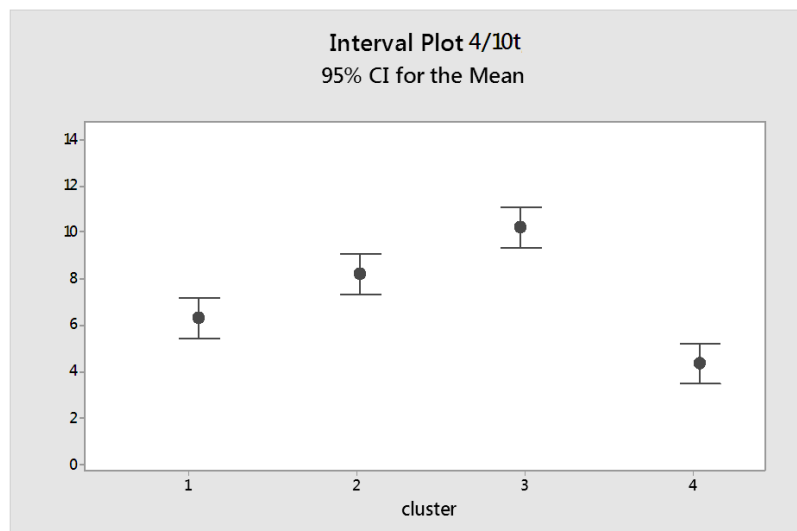


Figura 22, Intervalos de confianza para el décimo 4/10t de la base de datos uruguaya



6. Taxonomía de los proyectos de construcción en base a su tiempo de ejecución

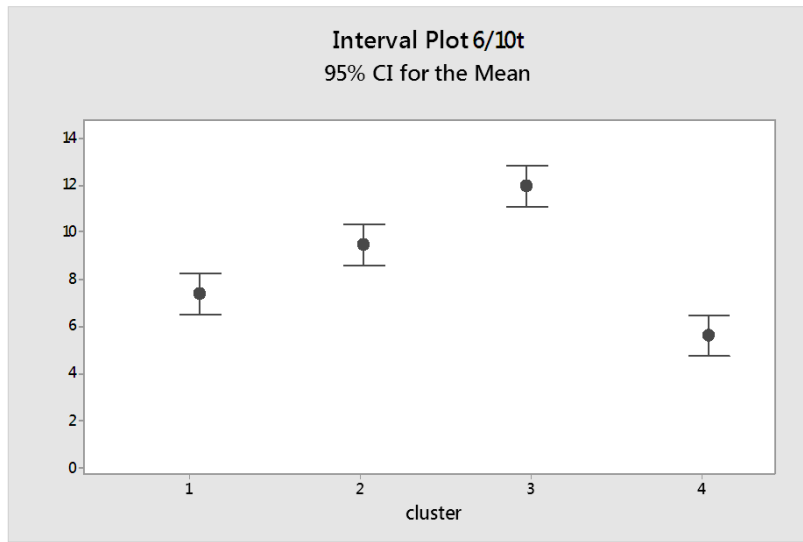


Figura 23, Intervalos de confianza para el décimo 6/10t de la base de datos uruguayaya

Una vez demostrada la disimilitud estadística entre los principales predictores, los nuevos proyectos de las bases de datos de validación se clasificaron entre los grupos propuestos utilizando los predictores claves. Se puede decir que un nuevo proyecto de construcción pertenece a un conglomerado si todos sus elementos pertenecen a los centroides de los predictores principales (es decir que su valor se encuentra dentro del intervalo de confianza para cada uno de los predictores claves). La Tabla 14 se puede usar como referencia para clasificar un nuevo proyecto dentro de las 4 taxonomías obtenidos. Para que el proyecto de construcción sea de su propiedad, debe pertenecer a los 3 predictor clave entre la LCS y el LCI.

Tabla 14, Valores de intervalos de confianza para la clasificación de nuevos proyectos en las taxonomías obtenidas

Variables	LCS				LCI			
	C1	C2	C3	C4	C1	C2	C3	C4
3/10t (%)	5,97	9,36	12,12	4,73	4,54	5,69	9,87	3,35
4/10t (%)	6,81	9,25	12,03	4,41	4,24	6,81	9,85	3,35
6/10t (%)	8,53	10,77	13,19	6,48	6,42	8,51	11,00	4,50

## 6. Taxonomía de los proyectos de construcción en base a los tiempos de ejecución

---

A continuación, se describe un ejemplo práctico. Para ello se selecciona el proyecto de construcción "El Cañaveral" perteneciente a la base de datos españolas a modo de ejemplo, Tabla 15.

Tabla 15, Proyecto de construcción "El cañaveral"

1/10t	2/10t	3/10t	4/10t	5/10t	6/10t	7/10t	8/10t	9/10t	10/10t	ES
4,21	7,41	9,32	8,23	4,08	10,09	9,13	9,55	9,55	8,48	25,00

Teniendo en cuenta los predictores claves (3 / 10t, 4 / 10t y 6 / 10t) y utilizando la Tabla 14, se puede decir que este proyecto pertenece al clúster C2. El predictor 3/10 está entre 5,69% y 9,36%, el predictor 4/10 pertenece al intervalo de confianza que va desde 6,81% hasta 9,25%, y el predictor 6/10 está entre 8,51% y 10,77%, cumpliendo con los criterios de clasificación propuestos.

Este mismo estudio se ha llevado a cabo para cada uno de los proyectos de ambas bases de datos de validación, obteniendo una clasificación de los proyectos de validación en los clústeres propuestos.

Finalmente, para obtener la capacidad de predicción de la taxonomía creada, se calculó el valor absoluto de la diferencia entre el retraso promedio del clúster (centroide de ES para cada clúster) y el retraso de cada uno de los proyectos que pertenecen al mismo. Para el caso de ejemplo, este valor se calcula como el valor absoluto de la diferencia entre 27,08% y 25,00, es decir, 2,08%.

Para todos los proyectos que pertenecen a las dos bases de datos de validación se calculó esta diferencia. La capacidad predictiva de la clasificación obtenida se calcula como el promedio de todas las diferencias previamente calculadas. Usando este criterio, se obtuvo una diferencia media de 2,36% para la base de datos española, y 4,72% para la base de datos de la literatura, con un promedio de un valor de precisión en la predicción de 3,54%.

## 6.6 CONCLUSIONES

Se determinaron cuatro comportamientos típicos de proyectos de construcción mediante el uso de un análisis de conglomerados. El estudio fue validado con éxito a través de un ANOVA utilizando los métodos de Tukey y

Fisher. Se desarrolló un método para determinar la pertenencia de nuevos proyectos a los conglomerados propuestos utilizando una base de datos uruguaya y se validaron de forma cruzada con dos bases de datos adicionales: española y de la literatura. En general, los comportamientos típicos detectados son:

- a. Los proyectos que realizan un 5% del trabajo en los primeros dos décimos y mantienen un ritmo constante hasta la finalización (más del 10% por cada décimo restante de obra), pudiendo finalizar en la fase inicial en el tiempo previsto.
- b. Los proyectos que comienzan con una tasa de avance constante, pero sufren retrasos menores que culminan con un retraso total de casi el 27% del tiempo planificado.
- c. Los proyectos que comienzan con un rendimiento inferior a la tasa planificada y terminan con un retraso promedio del 64%.
- d. Los proyectos que comienzan con un rendimiento deficiente, sufren grandes retrasos y terminan con un retraso promedio del 120% con respecto al tiempo de finalización previsto.

Los grupos obtenidos componen una herramienta para identificar el comportamiento de los nuevos proyectos de construcción al comparar su desempeño laboral actual con la base de datos validada. Esto permite la corrección de las estimaciones iniciales del avance de la obra hacia aproximaciones sucesivas más precisas.

Se puede concluir además que es posible tener una capacidad predictiva aceptable cuando se utilizan indicadores al 30% del tiempo estimado, pero solo cuando se alcanza el 60% del valor del tiempo previsto de obra el método permite tener datos más precisos sobre el comportamiento de los proyectos. Además, en la fase de validación se obtuvo un error del 3,54%. Esta herramienta permitiría a los gestores clasificar sus proyectos en las taxonomías determinadas, pudiendo anticipar el comportamiento tendencial del proyecto en cuanto a sus tiempos de ejecución.



# 7. TAXONOMÍA DE LOS PROYECTOS DE CONSTRUCCIÓN EN BASE AL FLUJO DE FONDOS

---

## 7.1 INTRODUCCIÓN

Una de las principales causas de retraso en los proyectos de construcción tiene que ver con los problemas financieros. Esto se deriva principalmente de una deficiente gestión de los flujos de caja y la inadecuada planificación del proyecto económico que acompaña al de construcción.

En el repaso del análisis de la literatura realizado en el Capítulo 2, varios estudios muestran la relación ente los problemas financieros, la mala gestión económica y los retrasos en los proyectos de construcción: (Mansfield, et al., 1994), (Ogunlana & Promkuntong, 1996), (Odeyinka & Yusif, 1997), (Ahmed, et al., 2003), (Frimpong & Oluwoye, 2003), (Long, et al., 2004), (Koushki, et al., 2005), (Acharya, et al., 2006), (Zaneldin, 2006), (Alaghbari, et al., 2007), (Moura, et al., 2007), (El Razek, et al., 2008), (Le-Hoai, et al., 2008), (Al-Hadi Tumi, et al., 2009), (Al-Kharashi & Skitmore, 2009), (Kaliba, et al., 2009), (Abdullah, et al., 2010), (Chileshe & Danso, 2010), (Fugar & Adwoa, 2010), (Kazaz, et al., 2012), (Kikwasi, 2012), (Mohammed & Danladi, 2012), (Akogbe, et al., 2013), (Gündüz, et al., 2013), (Sweis, 2013), (Marzouk & El-Rasas, 2014), (Gluszak & Lesniak, 2015), (Mukuka, et al., 2015), (Al-Hazim, et al., 2017) y (Nyoni & Bonga, 2017).

Los problemas financieros, que suelen ser consecuencia de una mala gestión del plan económico y del flujo de efectivo provocan que un proyecto se quede sin fondos (Assaf & Al-Hejji, 2006). La falta de flujo de efectivo durante la ejecución no permite que el proyecto continúe hasta que haya una nueva inyección de

capital disponible (Marroquín Liu, 2010). Esta situación frecuentemente trae como resultado un retraso en el plazo previsto de fin de obra (Viles, et al., 2019).

Los flujos de efectivo o flujo de caja se definen como el movimiento real de dinero dentro y fuera de cualquier negocio. El flujo de caja positivo es el dinero que fluye hacia el negocio, mientras que el flujo de efectivo negativo es el dinero que se paga por conceptos de gastos. El flujo de efectivo neto es la diferencia entre los flujos de efectivo positivos y negativos, (Odeyinka & Yusif, 1997).

La variación en el flujo de efectivo de los proyectos de construcción es la diferencia entre los flujos de efectivo de construcción realmente ejecutados y los flujos de caja previstos. El flujo de efectivo previsto es la cantidad estimada de dinero que se recibirá o gastará en las diferentes etapas del proyecto, mientras que los flujos de caja son las cantidades real de dinero generadas por la diferencia entre gastos y ganancias durante el proyecto de construcción en ejecución, (Kihale, 2011).

Las variaciones que se producen en el flujo de caja real en relación con el previsto se deben a diversos factores de riesgo durante la ejecución de los proyectos de construcción. Y son varios los estudios encontrados en la literatura que estudian modelos estadísticos para predecir el comportamiento de los flujos de caja teniendo en cuenta los factores de riesgo detectados en sus propios estudios. Estos estudios se describen a continuación en orden cronológico.

Uno de los primeros estudios fue llevado a cabo por (Nazem, 1968) proponiendo un modelo de flujo de caja neto con el objetivo de descubrir curvas de balance estándar en los proyectos de construcción. Este autor intentó desarrollar un modelo para predecir los posibles requerimientos de capital futuro con el fin de planificar previamente los gastos que se deben afrontar en el proyecto de construcción. A pesar de la intención, el método no ha sido reafirmado con éxito debido a problemáticas con los datos para la etapa de validación.

(Hardy, 1970) utilizó un sistema con curvas de flujo de caja derivadas de la aplicación de tasas de efectivo acumuladas. Este autor afirma utilizar este sistema

porque, generalmente, no es práctico determinar cuándo se producirán las liberaciones en cada etapa del proyecto. El modelo de Hardy fue testeado bajo hipótesis teóricas de trabajo y el modelo fue validado estadísticamente en diferentes escenarios. (Cleaver, 1971) propuso una alternativa a los modelos predictivos anteriores, también utilizando curvas de referencia hipotéticas, pero proponiendo no estudiar el flujo de caja rubro a rubro, sino de un modo generalizado, es decir como un balance general del proyecto. Es debido a esto, que el modelo de este autor permite encontrar los montos de capital operativo necesario para la ejecución de un proyecto en cada una de las etapas, modelo que ha sido validado bajo hipótesis teóricas.

(Peterman, 1979) utilizó el método de demora media ponderada para modelar los flujos de caja netos en proyectos de construcción. Este método aplica retrasos teóricos sistemáticos al perfil de flujo de caja entrante, para calcular el perfil de flujo de caja saliente. Estudios análogos se llevaron a cabo por (Ashley & Teicholz, 1977) y (McCaffer, 1979). Posteriormente, (Kenley, 1985) creó un modelo para determinar las curvas aparentes de flujo de caja. A pesar de ello el autor menciona que el método debe adaptarse a las características específicas de cada proyecto resultando compleja la generalización.

(Kenley & Wilson, 1989) desarrollaron el primer modelo que utilizó los datos de flujo de caja reales de cuatro proyectos de construcción para desarrollar un modelo matemático. A pesar de la gran contribución que tiene un modelo creado a partir de proyectos reales, la baja cantidad de datos existentes no permitió validar completamente los resultados obtenidos. Más tarde (Punwani, 1997) analizó las principales empresas de construcción del Reino Unido con el mismo fin y, algunos años después, (Khosrowshahi & Kaka, 2003) describió un modelo como una herramienta de apoyo a la decisión para los gestores de proyecto.

Más recientemente, (Odeyinka, et al., 2008) han identificado y evaluado el impacto de los factores de riesgo responsables de la variación entre el flujo de caja de la construcción previsto y real. A pesar del análisis y las conclusiones sobre dichos factores, no se ha realizado ninguna validación con datos de proyectos reales.

(Reza & Bagherpour, 2013) han utilizado el Modelo de Valor en Riesgo (VAR) para analizar el flujo de caja de los proyectos de construcción. Dichos autores simularon un flujo de caja del proyecto que incluye trabajos adicionales, órdenes de cambio y reparaciones para determinar los riesgos financieros del proyecto realizado. Se desarrollaron y simularon diferentes escenarios, determinando la correlación estadística de estos factores con el riesgo de fluctuaciones en el flujo de caja, pero bajo hipótesis teóricas.

También (Kimata, et al., 2017) han analizado recientemente las relaciones entre las variaciones en los flujos de caja pronosticados y los factores de riesgo significativos involucrados en los proyectos de construcción. Su estudio se basa en un cuestionario realizado en Tanzania y los factores que se tienen en cuenta incluyen: escasez de recursos clave, cambios en la tasa de cambio, inestabilidad financiera del gobierno, entre otros. Estos factores de riesgo muestran relaciones causales significativas con variaciones en los flujos de efectivo proyectados para la construcción de proyectos de construcción. Además, los autores presentan un modelo para determinar la relación estadística entre los factores de riesgo y las variaciones en los flujos de efectivo, evidenciando la correlación estadística.

Al analizar lo que proponen todos estos autores se puede decir que, por un lado, existen modelos estadísticos que muestran relaciones potenciales entre los factores de riesgo y las variaciones del flujo de efectivo en los proyectos de construcción. Por otro lado, la mayoría de estos estudios proponen modelos estadísticos que utilizan estos factores de riesgo para determinar posibles tendencias de comportamiento del flujo de caja. En general, estos predictores de riesgo dependen del contexto en el que se realizaron los estudios.

Consecuentemente, si bien hay algunos estudios sobre el comportamiento financiero en los proyectos de construcción y la previsión de flujo de efectivo, es difícil encontrar en la literatura un modelo unificado para la toma de decisiones que abarque un comportamiento tendencial generalizado de los flujos de caja. En la literatura se han encontrado varios modelos estadísticos de predicción de flujo de caja basados en indicadores relevantes que cada autor propone, pero que no proporcionan una visión integral del comportamiento financiero del proyecto.



Al igual que sucede con la determinación de la taxonomía de los cronogramas de obra (Capítulo 6), lo que en este Capítulo 7 se propone en este apartado es analizar si es posible determinar una taxonomía de comportamiento de los flujos de caja. La determinación de los comportamientos típicos de las liberaciones de efectivo en los proyectos de construcción permitirá, por un lado, la planificación más certera en las etapas de diseño en lo que respecta al flujo de dinero que debe afrontar la empresa constructora; y por el otro lado, poder determinar el comportamiento tendencial durante la etapa de ejecución a través de la clasificación de nuevos proyectos en la taxonomía que se genere, pudiendo emplearse ésta en predecir futuros comportamientos para la toma de decisiones de índole financiera antes que los problemas ocurran.

## 7.2 METODOLOGÍA

El estudio necesario para desarrollar esta taxonomía se llevó a cabo en cuatro fases. La primera fase consistió en la recopilación y estudio de las bases de datos. La segunda fase se refiere al desarrollo de una técnica estadística, similar a la expuesta en el apartado anterior, para lograr una clasificación del comportamiento de los flujos de caja en los proyectos de construcción. La tercera fase determinó las métricas que podrían usarse para clasificar los nuevos proyectos de construcción en las taxonomías propuestas. Finalmente, en la última fase, se propuso una validación de la taxonomía generada utilizando una nueva base de datos.

Este apartado incluye además el análisis de la posible correlación entre las taxonomías de comportamiento de cronogramas de obra y de flujos de caja, buscando determinar la relación entre ambos comportamientos.

### 7.2.1 CARACTERIZACIÓN DE LA MUESTRA

Para la realización del análisis de conglomerados y la determinación de la taxonomía de comportamiento de los flujos de caja en los proyectos de construcción se utilizó una base de datos independiente de las hasta ahora utilizadas. La misma se compone de datos referentes a 82 proyectos de

construcción y 12 proyectos para la fase de validación. En este caso se trata de proyectos de vivienda promovidos socialmente, principalmente edificaciones en altura en zonas urbanas, de los cuales, gracias a la ley de acceso de datos en Uruguay fue posible conseguir datos referentes no solo a los tiempos de obra (cronogramas de ejecución), sino también a los desembolsos en cada una de las etapas de las obras (flujos de caja), datos imprescindibles para la realización del análisis de conglomerados que se plantea.

Es así que los datos relacionados con los cronogramas de ejecución (no solo los cronogramas ejecutados, sino los planeados) y los flujos de caja en los periodos de ejecución fueron recabados para los 82 proyectos de la base de datos principal y de los 12 proyectos de la base de datos de validación. Para todos los datos se aplicó el sistema de discretización en décimos explicado en el Capítulo 6 con el fin de hacer comparables los proyectos con diferentes tiempos estimados de obra. Igualmente, cabe remarcar algunas diferencias con respecto a la discretización realizada para la determinación de las taxonomías de comportamiento de los cronogramas de obra, Figura 24.

El método de discretización en 10 partes iguales del tiempo planeado de obra es el mismo, solamente que para este caso la medición de la variable  $0/10t$  pasa a tener sentido. En el caso de cronogramas de obra en el tiempo  $0/10t$  no se tiene avance físico de la misma, porque los procesos de certificación de progreso se realizan a trabajo terminado. Por lo que todo el avance ejercido durante el periodo de tiempo entre  $0/10t$  y  $1/10t$  se ve reflejado recién en el décimo  $1/10t$ .

En el caso de flujos de caja es diferente, porque el flujo de dinero comienza a circular en el tiempo  $0/10t$ , es decir, en la etapa de implantación y de primeros trabajos que requieren gastos financieros. Estas inversiones en el tiempo  $0/10t$  son las que permiten que el flujo de trabajo se realice y se pueda realizar certificaciones y avances en los cronogramas de obra en el tiempo  $1/10t$ .

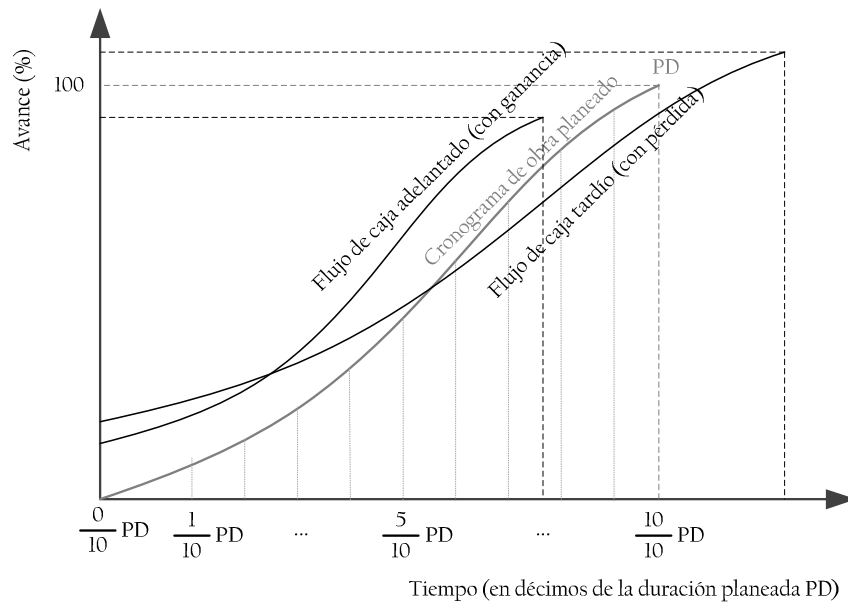


Figura 24, Discretización de la base de datos en décimos del tiempo planeado.

Además, en este caso el indicador ES tiene un significado también diferente. En el caso de cronogramas de obra el indicador ES representa la cantidad de tiempo adicional (en caso de que la obra se retrase) para que se culminen las tareas planeadas. En el caso que la obra termine antes de tiempo, representa la cantidad de tiempo que el proyecto puede permanecer sin avance y que esta situación no produzca un retraso en el cronograma previsto. En cambio, en el caso de flujos de caja el indicador ES representa la cantidad de dinero que debe gastarse (en caso de ser positivo) o que la empresa ha ahorrado (en caso de ser negativo) al final del trabajo. Es decir, que, en lugar de una medida de tiempo, pasa a representar una medida de dinero ahorrado o gastado en función del dinero previsto en el flujo de caja original.

La Figura 24 representa un cronograma de construcción dividido en 11 periodos iguales con dos flujos de caja diferentes. En el primer proyecto de construcción tiene un flujo de caja que ha excedido el tiempo estimado de obra

y, por lo tanto, el proyecto ha requerido más dinero que el monto estimado inicialmente. En el segundo proyecto, el proceso de construcción culminó antes del tiempo planificado, reduciendo los costes fijos y completando el trabajo con menos dinero del que se había estimado inicialmente.

Para todos los datos contenidos en las dos bases de datos de flujos de caja se ha utilizado el sistema discreto y se ha obtenido el progreso financiero para cada proyecto (es decir, el porcentaje del dinero estimado que se ha liberado) para cada una de las 11 porciones del tiempo de construcción planificado, incluyendo el tiempo  $0/10t$  y el indicador ES en las condiciones mencionadas.

### 7.2.2 ANÁLISIS DE CONGLOMERADO

El análisis de conglomerados, conocido como también como taxonomía numérica o el reconocimiento de patrones es una técnica estadística multivariante que ha sido explicada anteriormente y que tiene por objetivo dividir un grupo de objetos en grupos de tal manera que, los perfiles de los objetos del mismo conglomerado sean muy similares (cohesión interna), y los perfiles de los objetos de diferentes grupos son distintos, (Hair, et al., 2004).

En este caso el proceso de selección de variables, que se encuentran específicamente relacionadas con el objeto de análisis fue el siguiente:

(1) Hay un número  $N$  de datos cuya información está cifrada en una serie de  $n$  variables (en este caso,  $N$  es el flujo de caja de 82 proyectos de construcción, para el cual  $n =$  Se medirán 12 variables:

- Las 11 porciones del tiempo previsto de flujo de caja que incluyen los  $10/10t$  décimos del tiempo revisto y el indicador  $0/10t$ .
- El indicador ES para el caso de flujo de caja, representando la falta o excedente de dinero con respecto al planeado.

(2) Se establece un criterio para determinar similitudes de datos; en este caso, procederemos a considerar las 12 variables explicativas para determinar las similitudes entre los  $N$  datos utilizando la distancia euclídeana. Cuando se elige una distancia como una medida asociativa (por ejemplo, la distancia Euclídea o

Euclideana), los grupos formados contendrán individuos similares de tal manera que la distancia entre ellos sea la más corta posible en el espacio de las  $n$  variables.

(3) Se establece un criterio de clasificación para determinar la estructura de agrupación. En este caso, se utiliza el método de distancia máxima (vecino más lejano o enlace completo) por las mismas razones expresadas en el Capítulo 6.

(4) Finalmente, la estructura obtenida se representa mediante dendrogramas o diagramas de árbol para mostrar los resultados del agrupamiento que se han obtenido al procesar los datos de  $N$  con sus  $n$  variables.

Antes de proceder al análisis debemos determinar qué tan similares son los elementos, dependiendo de cuán lejos están sus representaciones en el espacio de  $n=12$  variables seleccionadas. La mayoría de los índices de similitud se basan en la medición de la distancia euclidiana, es decir, la medición espacial entre dos individuos,  $i$  y  $j$ , representados como  $d(i, j)$ . El valor  $d(i, j)$  siempre es positivo y, a medida que el valor aumenta, esto significa que dos de los puntos  $N$  están más alejados en el espacio de las variables  $y$ , por lo tanto, son menos similares.

Si representamos el estudio que se realizará mediante vectores en el espacio de variables, podemos afirmar que tenemos  $C_1 \dots C_i \dots C_{82}$  y que los porcentajes de desembolso de dinero que se expresan en cada uno de las porciones del tiempo planeado, así como el indicador  $ES$  representan las 12 variables para cada uno de los elementos  $C_i = \left( \frac{0}{10}t, \frac{1}{10}t, \dots, \frac{9}{10}t, \frac{10}{10}t, ES \right), i = 1 \dots 82$ . Luego, la  $d(i, j)$  se determina entre  $C_i - C_j$ , (Scott & Knott, 1974).

Existen diferentes métodos de clasificación en la literatura. Los más utilizados son los métodos jerárquicos, los métodos de optimización, los métodos de densidad (o búsqueda de modos) y los métodos de "agrupamiento" (o partición), (Dillon & Goldstein, 1984). Los métodos jerárquicos son los más reconocidos y utilizados, por lo que hemos decidido seguir este procedimiento para el análisis de conglomerados en esta investigación. En esta técnica, los elementos no se dividen en un clúster único cada vez; en su lugar, se hacen

particiones sucesivas y distintas en niveles crecientes de agrupamiento. Además, se utilizó el método de clasificación de "enlace completo".

Este método utiliza un algoritmo general para obtener la clasificación ascendente jerárquica, pero considerando la distancia entre grupos como la distancia entre los individuos más lejanos. El método considera que la distancia o similitud entre dos grupos debe medirse de acuerdo con sus elementos más dispares, es decir, la distancia entre dos grupos está dada por la distancia máxima (o similitud mínima). Es así, que, siguiendo los pasos anteriormente descritos se obtienen una serie de grupos óptimos, o conglomerados que describen el comportamiento típico del flujo de caja en los 82 proyectos basados en las 12 variables de agrupamiento.

### 7.2.3 SELECCIÓN DE CRITERIOS PARA LA CLASIFICACIÓN

Si la taxonomía del comportamiento de flujos de caja aquí presentada se utilizará como una herramienta de gestión, es necesario generar un método para determinar cuándo un proyecto pertenece a uno de los grupos óptimos determinados en el análisis de conglomerados. De esta manera, los comportamientos típicos se convierten en una herramienta de gestión para determinar los comportamientos futuros de nuevos flujos de caja en base a los datos reales de comportamiento de otros proyectos de construcción similares. Para determinar qué proyectos pertenecen a un clúster específico, es necesario determinar las métricas que se utilizarán para realizar la asignación.

Los indicadores o métricas que se estudiarán con el fin de determinar la pertenencia de nuevos proyectos a los conglomerados determinados serán los décimos de avance del flujo de caja. Es decir, las  $n$  variables para el estudio de conglomerados de flujos de caja.

A partir de estos, se buscará determinar cuál de las 11 porciones del tiempo previsto explica mejor la variabilidad observada en el índice ES. De esta manera, será posible determinar cuál o cuáles de las 11 variables de los flujos de caja influyen en la variación del dinero gastado en función del dinero planeado.

Pudiendo predecir de mejor modo los flujos de caja y posiblemente evitando desfinanciamientos en los proyectos de construcción venideros.

Para ello, análogamente al Capítulo 6 se utilizó el método de regresión múltiple con los mejores subconjuntos. En Regresión múltiple, utilizar la técnica del "mejor modelo de subconjuntos" implica que el  $R^2$  ajustado para la métrica seleccionada contiene el mejor valor posible. Una vez que se obtuvieron las métricas  $C_i$  que mejor explican el comportamiento de la variable ES, se calcularon los intervalos de confianza para verificar las diferencias estadísticas entre estas métricas seleccionadas.

En el caso de que la combinación de predictores dé como resultado intervalos de confianza estadísticamente similares, se buscará la mejor combinación siguiente que proporcione disimilitud. De este modo se obtienen métricas para la clasificación que son estadísticamente independientes unas de otras.

Estas métricas se podrán utilizar para clasificar los nuevos proyectos dentro de los grupos obtenidos en el estudio. Se puede decir que un nuevo flujo de caja de un proyecto de construcción pertenece a uno de los clústeres que se han determinado en esta investigación cuando todas sus métricas clave se encuentran entre el intervalo de confianza en 95%. Dado el hecho de que la diferencia estadística entre estas métricas clave se ha estudiado y comprobado, cuando el flujo de caja de un proyecto se ha clasificado dentro de un grupo, estadísticamente, se puede decir que no pertenece a otro grupo.

#### 7.2.4 FASE DE VALIDACIÓN

Los resultados fueron validados mediante el uso de una nueva base de datos que contiene 12 proyectos no dependientes de las bases de datos de origen. Para validación, la nueva base de datos de 12 proyectos de construcción se estandarizó en el sistema discreto de décimos del tiempo previsto. Luego, cada uno de los proyectos fue clasificado en los conglomerados o clústeres propuestos según las variables críticas que se determinan en el capítulo 7.2.3. De este modo se clasificaron los nuevos proyectos en las taxonomías propuestas y se validó la consistencia del proceso de clasificación.

### 7.2.5 CORRELACIÓN ENTRE TAXONOMÍAS DE CRONOGRAMA DE OBRA Y FLUJO DE CAJA

Finalmente, se analizó la relación estadística entre la taxonomía de comportamiento de cronogramas de obra (Capítulo 6) y la taxonomía de comportamiento de los flujos de caja (Capítulo 7). Lo que motivó este análisis de este análisis fue ver si era posible entender el funcionamiento del avance del proyecto en función de sus liberaciones económicas y viceversa.

Para determinar la correlación potencial entre ambos análisis de conglomerados se siguió el siguiente procedimiento:

(1) Primero, los 12 nuevos proyectos de construcción de la base de datos de flujos de caja (de validación) se estandarizaron en el sistema de métricas de décimos. Cabe mencionar que para estos 12 proyectos no solo se tiene acceso a su flujo de caja, sino también a sus cronogramas de obra. Por lo que ambos cronogramas fueron estandarizados uno en 10/10t (para el caso de cronogramas de obra) y otro sobre 11/10t (teniendo en cuenta el indicador 0/10t de liberaciones iniciales de dinero y las 10 porciones del tiempo previsto para el caso de flujos de caja).

(2) Luego, cada uno de los 12 proyectos se clasificó en los clústeres correspondientes a los cronogramas de obra (teniendo en cuenta las métricas obtenidas en el capítulo 6.5) y en los correspondientes a los flujos de caja (teniendo en cuenta las métricas que se muestran en el capítulo 7.5).

(3) Se buscaron similitudes de comportamiento entre los grupos. Para ello se realizó un estudio particularizado de los cronogramas de obra y de los flujos de caja para determinar a grandes rasgos las etapas del proyecto que abarcan cada uno de los décimos. Asimismo, se buscó la correlación entre ambos conjuntos de conglomerados teniendo en cuenta los comportamientos tendenciales en ambos casos.



### 7.3 CARACTERIZACION DE LA MUESTRA

Para la realización del estudio se utilizaron dos bases de datos independientes a las anteriormente utilizadas, una para determinar las taxonomías de los flujos de caja y otra para la etapa de validación y determinación de correlación entre las taxonomías de comportamiento de cronogramas de obra y de flujos de caja. La base de datos utilizada para la determinación de las taxonomías de los flujos de caja se compone de 82 proyectos de construcción y fue procesada estadísticamente, Tabla 16. En la misma se pueden ver los valores del intervalo de confianza superior (LCS) y el Intervalo de confianza inferior (LCI) al 95% y los valores máximos (Máx.) y mínimos (Mín). Del análisis de la base de datos, podemos deducir que los proyectos de construcción requieren, en promedio, un 8,88% del dinero estimado como inyección de capital en la primera etapa del proyecto. Más aún, se puede deducir que en promedio requieren una inyección de capital extra para finalizar los proyectos del 8,94%, monto que varía ente 7,63% y 10,26%.

Tabla 16, Caracterización de la base de datos de flujos de caja de proyectos de construcción

Variable	0/10t	1/10t	2/10t	3/10t	4/10t	5/10t
Promedio	8,88	9,51	10,85	10,38	10,81	9,32
Desviación	1,81	0,76	0,82	0,71	0,90	0,75
LCS	9,27	9,68	11,03	10,53	11,00	9,48
LCI	8,48	9,35	10,68	10,23	10,61	9,16
Max	21,33	10,53	12,77	12,34	12,00	12,00
Mín	6,68	6,25	6,33	7,21	7,55	8,22

Variable	6/10t	7/10t	8/10t	9/10t	10/10t	ES%
Promedio	10,39	9,16	9,16	9,95	9,71	8,94
Desviación	0,61	0,54	0,66	0,99	1,07	6,04
LCS	10,52	9,28	9,30	10,17	9,94	10,26
LCI	10,26	9,04	9,02	9,74	9,48	7,63
Max	11,20	10,64	10,81	11,09	10,88	35,65
Mín	7,05	7,58	7,64	6,85	6,75	4,09

Análogamente, la Tabla 17 muestra la caracterización de la base de datos de validación para los flujos de caja.

## 7. Taxonomía de los proyectos de construcción en base a los flujos de fondos

Tabla 17, Caracterización de la base de datos de validación de flujos de caja de proyectos de construcción

Variable	0/10t	1/10t	2/10t	3/10t	4/10t	5/10t
Promedio	9,11	10,05	11,17	10,60	11,30	9,46
Desviación	0,42	0,36	0,40	0,41	0,49	0,37
LCS	9,28	10,19	11,33	10,77	11,50	9,61
LCI	8,94	9,90	11,01	10,44	11,11	9,31
Max	9,67	10,43	11,65	11,09	11,85	9,90
Min	7,79	9,32	10,34	9,77	9,77	8,75

Variable	6/10t	7/10t	8/10t	9/10t	10/10t	ES%
Promedio	10,75	9,37	9,50	10,51	10,32	8,24
Desviación	0,38	0,42	0,41	0,51	0,58	1,44
LCS	10,91	9,53	9,67	10,72	10,56	8,81
LCI	10,60	9,20	9,34	10,31	10,09	7,66
Max	11,20	9,77	9,94	11,08	10,85	10,12
Min	9,88	8,43	8,71	8,88	8,10	5,30

Se puede concluir que los datos entre ambas bases de datos no difieren en gran medida, pero si los valores extremos son significativamente distintos. Esto puede deberse a que la base de datos de 82 proyectos está conformada por una mayor diversidad de proyectos, algunos de los cuales han demostrado falta de financiamiento, problemas de retrasos e incluso problemas de detenimiento o ralentización en el cronograma. Más aún, en la Tabla 18 se muestra la caracterización de la base de datos de validación pero para el caso de los cronogramas de obra. Esta base será utilizada en la determinación de la correlación entre ambas taxonomías.

Tabla 18, Caracterización de la base de datos de validación de cronogramas de proyectos de construcción

Variable	1/10t	2/10t	3/10t	4/10t	5/10t	6/10t	7/10t	8/10t	9/10t	10/10t	ES%
Promedio	5,77	7,71	7,75	8,03	7,81	8,86	8,99	8,18	8,88	8,58	38,50
Desviación	5,17	3,67	3,93	3,03	4,15	3,33	3,94	3,02	3,72	4,70	25,13
LCS	7,88	9,21	9,35	9,27	9,50	10,22	10,60	9,41	10,40	10,50	48,78
LCI	3,65	6,21	6,15	6,80	6,11	7,50	7,38	6,95	7,36	6,65	28,23
Max	17,62	20,00	16,69	14,25	18,00	14,97	17,74	16,19	14,41	16,27	86,67
Min	0,26	2,81	2,82	2,95	2,13	3,01	2,51	3,32	0,01	0,00	0,00

## 7.4 TAXONOMÍA OBTENIDA

Para los 82 proyectos de construcción, se ha construido un gráfico de puntos para estudiar la distribución estadística de los datos (Figura 25).

Del mismo modo, en la Figura 26, se puede ver el diagrama de caja para la base de datos de flujos de caja de los proyectos de construcción. En este gráfico se pueden apreciar además los puntos (proyectos) que se encuentran fuera de rango.

Los proyectos que pertenecen a las filas 23 y 29 de la base de datos se han determinado como anomalías, por lo que el estudio se repitió sin incluir estos datos. Ver Figura 27 y Figura 28.

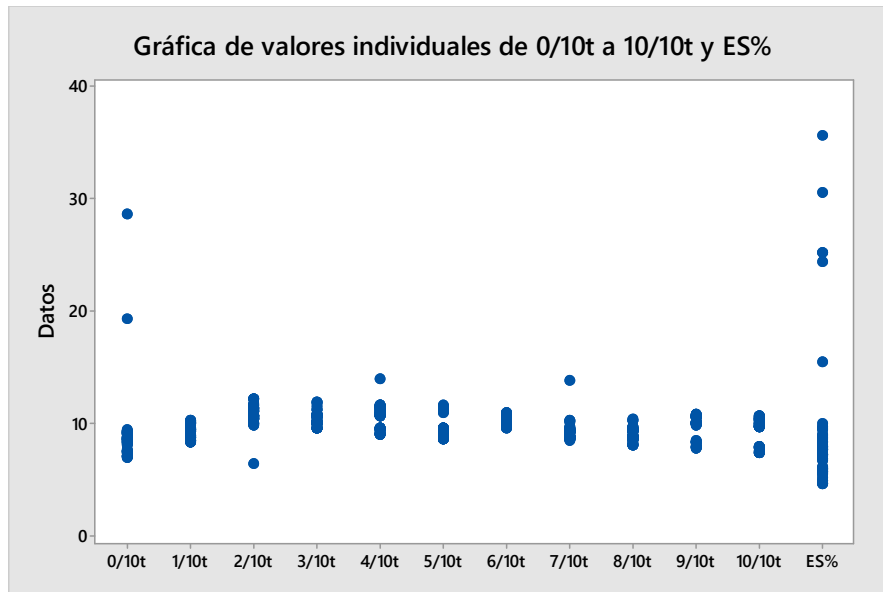


Figura 25, Gráfica de puntos individuales para la base de datos de flujos de caja

7. Taxonomía de los proyectos de construcción en base a los flujos de fondos

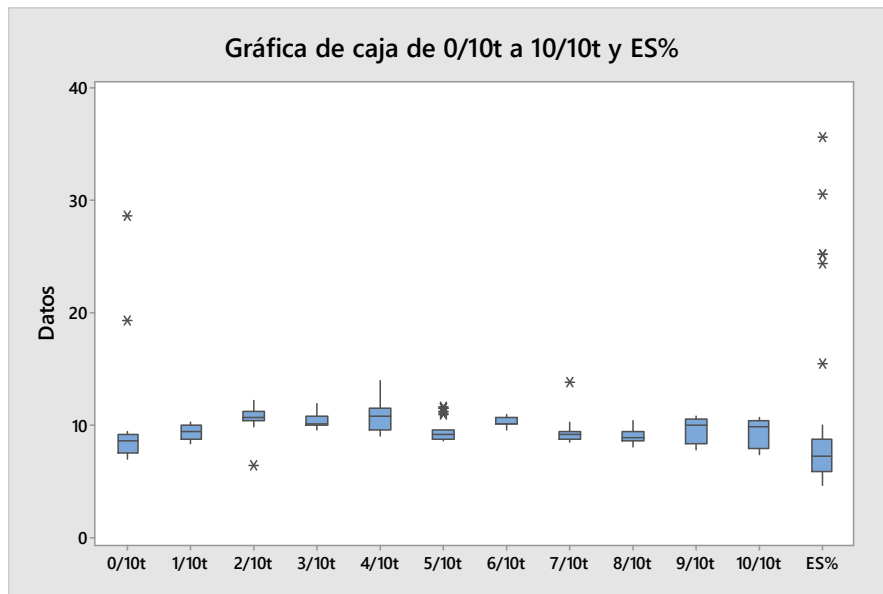


Figura 26, Gráfica de caja para la base de datos de flujos de caja –puntos fuera de rango.

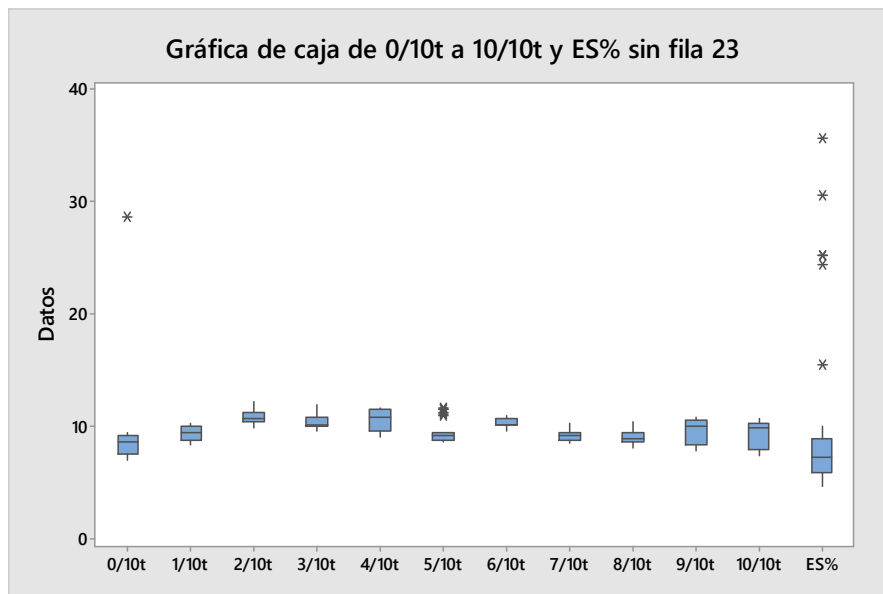


Figura 27, Gráfica de caja para la base de datos de flujos de caja –exclusión fila 23.

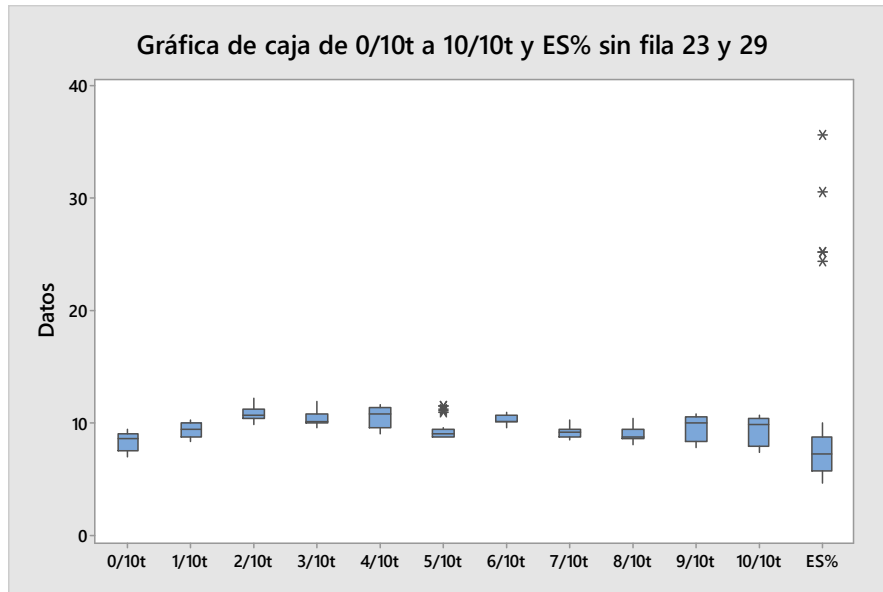


Figura 28, Gráfica de caja para la base de datos de flujos de caja –exclusión fila 23 y 29.

Se estudiaron el resto de las anomalías observadas y se decidió conservarlas en la base de datos.

Los proyectos que provocan una anomalía en el indicador 0/10t son, en general, proyectos de construcción en donde se han invertido cantidades de dineros anómalas en las etapas iniciales, pero que representan realidades de los proyectos de construcción que no se quieren eliminar. Los proyectos que provocan una anomalía en los indicadores 4/10 y 5/10 indican diferencias en las etapas de suministro de los trabajos de construcción, y ofrecen algunos datos interesantes para ser considerados.

Los proyectos que provocan una anomalía en las indicadores 9/10 y 10/10 representan las etapas de finalización. Cada uno de estos datos es valioso cuando se realiza el análisis y no se considerarán como anomalías durante el estudio. Después del análisis de anomalías, se utilizó el análisis de conglomerados para determinar las similitudes entre los proyectos y, estudiar su posible clasificación.

La agrupación de enlace completo es uno de los varios métodos de agrupamiento en un método de clústering. Al comienzo del proceso, cada elemento se encuentra en un grupo propio. Luego, los grupos se combinan secuencialmente en grupos más masivos hasta que todos los elementos están en el mismo grupo. La proximidad entre dos grupos es la proximidad entre sus dos objetos más distantes, y el resultado de la agrupación se puede visualizar como un dendrograma (Figura 29) que muestra la secuencia de fusión de la agrupación y la distancia a la que tuvo lugar cada fusión.

El resultado del proceso de agrupamiento o aglomeración se puede ver expresado en la Tabla 19 y Tabla 20. Asimismo, en la Tabla 21 y Tabla 22 se pueden ver los datos de los centroides principales, la cantidad de datos que pertenecen a cada uno, las distancias al centroide principal, entre otros datos.

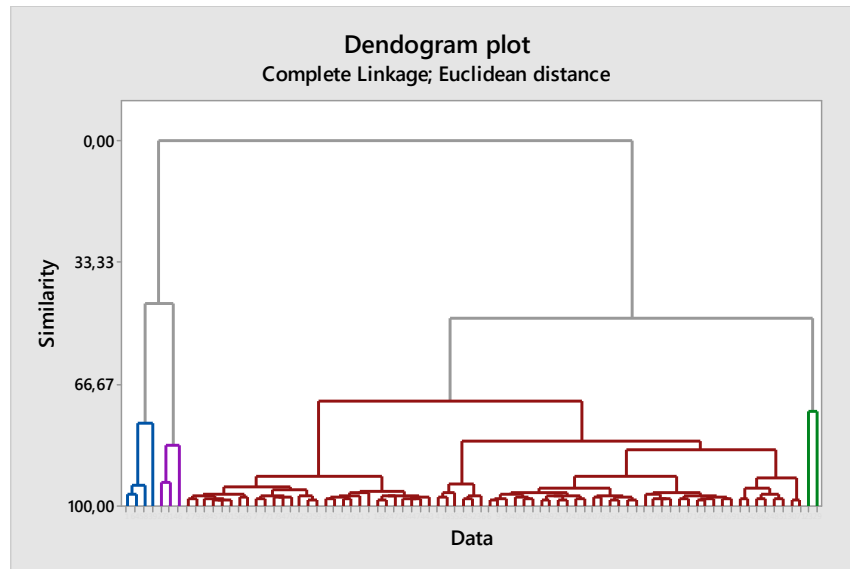


Figura 29, Dendrograma para la aglomeración de flujos de caja de proyectos de construcción.

A partir del gráfico 29 se puede concluir que existen cuatro flujos de caja típicos en los proyectos de construcción:

(1) En algunos proyectos de construcción, el 17% del capital total se emite en la etapa de fundación (iniciación), y el resto del dinero se distribuye uniformemente durante el período de construcción previsto. Estos tipos de proyectos tienen un bajo riesgo de des financiación y logran completar la construcción con una infusión de dinero adicional inferior al 5% del total del capital previsto.

(2) Los proyectos en los que aproximadamente el 18% del capital previsto se gasta en la etapa de fundación, pero se producen retrasos y, como resultado, necesitan una inversión adicional en torno al 10% del total del capital previsto.

(3) Proyectos en los que se producen imprevistos en la etapa de la fundación y, por lo tanto, se gasta alrededor del 33% del presupuesto para cubrir la etapa y poder continuar con la construcción. Estos proyectos requieren una infusión adicional de capital en torno al 23%, y el trabajo se termina con retraso debido a la falta de suministros que se deben afrontar como consecuencia de la falta de financiación.

(4) Finalmente, en algunos proyectos, más del 34% del presupuesto debe gastarse en la etapa de la fundación debido a eventos imprevistos, problemas con la previsión de implantación de obra y/o por debido al cambio de fundación por malos estudios previos. Estos proyectos comienzan a quedarse sin fondos cuando el progreso de la construcción físico es del 70%, lo que retrasa el plazo previsto para terminar el trabajo aún más. En la Figura 30 se puede ver la representación gráfica de los cuatro conglomerados obtenidos.

## 7. Taxonomía de los proyectos de construcción en base a los flujos de fondos

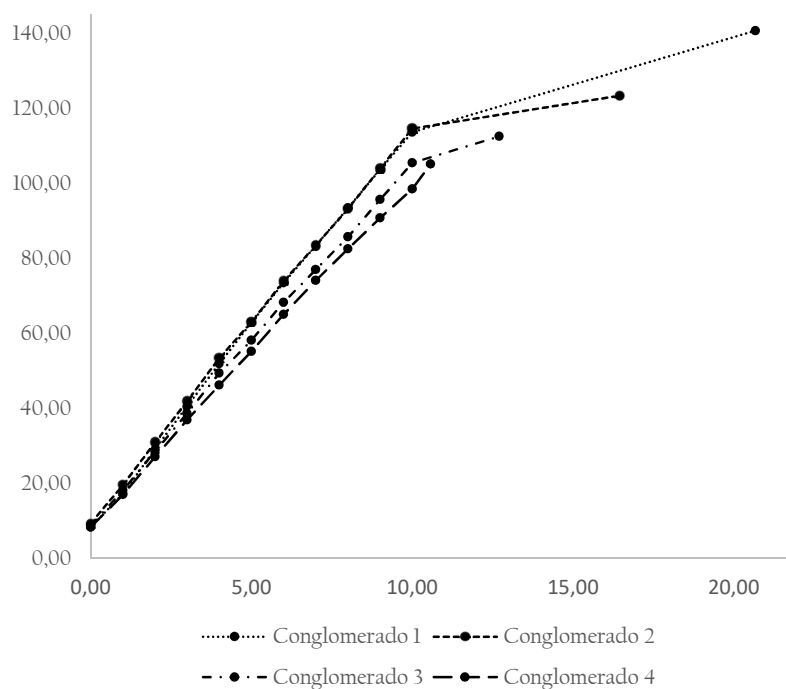


Figura 30, Gráfico de conglomerados de flujos de caja para los 82 proyectos de construcción

Cabe señalar que los comportamientos iniciales de los conglomerados obtenidos son similares en los primeros décimos, pero comienzan a diferir a medida que avanza el tiempo. La diferencia se hace más notable cuando los proyectos llegan a la mitad del tiempo previsto, en dónde se pueden distinguir sin problemas un tipo de proyecto del otro. Por lo tanto, se puede concluir que los problemas económicos comienzan a aparecer cuando el progreso se sitúa en el 50% del tiempo estimado para que se completen los trabajos de construcción.



7. Taxonomía de los proyectos de construcción en base a su flujo de fondos

Tabla 19, Proceso de aglomeramiento para flujos de caja de 82 proyectos, parte 1 (con descarte de elementos)

N° de Pasos	N° de Clústers	Nivel de similitud	Distancia	Clústers Unidos		Nuevo cluster	N° DE OBS NUEV. CLUS.
1	80	98,55	0,47	14	73	14	2
2	79	98,48	0,50	53	59	53	2
3	78	98,47	0,50	45	76	45	2
4	77	98,46	0,50	13	32	13	2
5	76	98,45	0,51	35	63	35	2
6	75	98,45	0,51	45	61	45	3
7	74	98,42	0,52	25	72	25	2
8	73	98,30	0,55	6	9	6	2
9	72	98,27	0,57	42	75	42	2
10	71	98,23	0,58	30	71	30	2
11	70	98,22	0,58	19	49	19	2
12	69	98,13	0,61	68	80	68	2
13	68	98,11	0,62	21	69	21	2
14	67	98,11	0,62	3	33	3	2
15	66	98,07	0,63	44	74	44	2
16	65	97,97	0,66	7	77	7	2
17	64	97,94	0,67	14	66	14	3
18	63	97,91	0,68	48	51	48	2
19	62	97,91	0,68	2	79	2	2
20	61	97,89	0,69	6	50	6	3
21	60	97,87	0,70	38	45	38	4
22	59	97,87	0,70	12	16	12	2
23	58	97,84	0,71	41	60	41	2
24	57	97,84	0,71	24	52	24	2
25	56	97,83	0,71	28	62	28	2
26	55	97,82	0,71	67	81	67	2
27	54	97,80	0,72	10	37	10	2
28	53	97,79	0,72	15	54	15	2
29	52	97,78	0,73	26	44	26	3
30	51	97,77	0,73	57	68	57	3
31	50	97,76	0,73	20	78	20	2
32	49	97,66	0,76	17	34	17	2
33	48	97,66	0,76	56	65	56	2
34	47	97,60	0,78	35	42	35	4
35	46	97,55	0,80	17	70	17	3
36	45	97,52	0,81	4	18	4	2
37	44	97,52	0,81	26	43	26	4
38	43	97,46	0,83	3	12	3	4
39	42	97,38	0,86	14	21	14	5
40	41	97,38	0,86	40	67	40	3
41	40	97,35	0,87	24	36	24	3
42	39	97,35	0,87	19	25	19	4

7. Taxonomía de los proyectos de construcción en base a los flujos de fondos

Tabla 20, Proceso de aglomeramiento para flujos de caja de 82 proyectos, parte 2 (con descarte de elementos)

N° de Pasos	N° de Clústers	Nivel de similitud	Distancia	Clústers Unidos		Nuevo cluster	N° de obs nev. Clus.
43	38	97,30	0,88	20	35	20	6
44	37	97,28	0,89	13	47	13	3
45	36	97,26	0,89	3	11	3	5
46	35	97,21	0,91	7	17	7	5
47	34	97,19	0,92	10	14	10	7
48	33	97,18	0,92	2	38	2	6
49	32	97,06	0,96	19	41	19	6
50	31	97,04	0,97	13	26	13	7
51	30	96,98	0,99	22	53	22	3
52	29	96,96	0,99	8	57	8	4
53	28	96,91	1,01	28	48	28	4
54	27	96,87	1,02	6	40	6	6
55	26	96,82	1,04	2	56	2	8
56	25	96,81	1,04	1	64	1	2
57	24	96,54	1,13	3	5	3	6
58	23	96,42	1,17	4	55	4	3
59	22	96,42	1,17	6	19	6	12
60	21	96,34	1,20	8	10	8	11
61	20	96,07	1,29	3	13	3	13
62	19	95,74	1,39	7	22	7	8
63	18	95,10	1,60	6	20	6	18
64	17	95,09	1,60	15	28	15	6
65	16	94,79	1,70	2	7	2	16
66	15	94,38	1,84	1	58	1	3
67	14	94,05	1,95	4	24	4	6
68	13	93,49	2,13	27	31	27	2
69	12	92,42	2,48	15	30	15	8
70	11	92,00	2,61	2	3	2	29
71	10	92,00	2,61	6	8	6	29
72	9	84,40	5,10	6	15	6	37
73	8	83,57	5,37	27	46	27	3
74	7	82,35	5,77	4	6	4	43
75	6	77,13	7,47	1	39	1	4
76	5	74,24	8,42	23	29	23	2
77	4	71,15	9,43	2	4	2	72
78	3	48,52	16,82	2	23	2	74
79	2	44,63	18,09	1	27	1	7
80	1	0,00	32,68	1	2	1	81

## 7. Taxonomía de los proyectos de construcción en base a su flujo de fondos

Tabla 21, Datos de distancias y composiciones de los conglomerados obtenidos

	N° de observaciones	Distancia promedio desde el centroide	Distancia máxima desde el centroide
Conglomerado 1	7	5,31	9,43
Conglomerado 2	29	0,86	1,48
Conglomerado 3	30	1,11	8,35
Conglomerado 4	15	3,31	14,67

Tabla 22, Datos de los centroides obtenidos en el análisis de conglomerados

Variable	Cong.1	Cong.2	Cong.3	Cong.4	Centroide principal
0/10t	8,36	9,32	8,84	8,35	8,88
1/10t	8,92	10,28	9,32	8,69	9,51
2/10t	11,94	11,38	10,49	10,07	10,85
3/10t	11,37	10,85	10,02	9,75	10,38
4/10t	11,27	11,56	10,72	9,32	10,81
5/10t	10,98	9,63	8,78	9,03	9,32
6/10t	10,61	10,92	10,11	9,82	10,39
7/10t	9,89	9,52	8,69	9,05	9,16
8/10t	10,04	9,71	8,77	8,47	9,16
9/10t	10,29	10,81	9,93	8,19	9,95
10/10t	9,90	10,63	9,78	7,70	9,71
ES%	27,08	8,74	6,03	6,69	8,94

En la siguiente fase, se utiliza un análisis estadístico para determinar los principales décimos que afectan al desfinanciamiento en los proyectos de construcción y por lo tanto al retraso de ellos. Este estudio permite determinar criterios para la clasificación de nuevos proyectos en las taxonomías propuestas. De este modo el modelo presentado puede ser utilizado como base para la definición de nuevos diseños financieros de los proyectos de construcción y/o puede utilizarse como herramienta de gestión durante la etapa de obra.

### 7.5 MÉTRICAS PARA CLASIFICAR NUEVOS PROYECTOS

Al igual que sucede con el análisis de conglomerados para cronogramas de obra, con el fin de generar un método de clasificación de nuevos proyectos en los

conglomerados de flujos de caja determinados, se realizó un estudio estadístico para la determinación de las métricas de clasificación.

A partir de un análisis previo de los datos, se puede deducir que existe variabilidad entre los diferentes décimos y que, no todos los décimos tienen la misma capacidad predictiva sobre el comportamiento de la variable ES que representa la cantidad de dinero extra o sobrante que se ha utilizado en comparación al dinero previsto. Es por eso que se ha buscado determinar los predictores claves que definen el comportamiento del indicador de ES utilizando la misma técnica de análisis mediante los mejores sub-conjuntos.

Como mencionamos en capítulos anteriores la técnica de regresión múltiple de los mejores subconjuntos permite determinar un modelo que contiene los predictores claves (en este caso se seleccionarán entre los 11 décimos y la variable a predecir será el indicador ES) y que obtiene el mejor valor de  $R^2$  ajustado.

Los resultados del análisis se muestran en la Tabla 23, en donde se puede ver que la combinación del predictor clave 3/10t y el predictor 6/10t obtiene un salto cualitativo en la predicción de  $R^2$  y a su vez utiliza la menor cantidad posible de predictores.

Más aún, se decidió seleccionar esta combinación porque los predictores claves que contiene son tempranos en el desarrollo de un proyecto. Por lo que los gestores de los proyectos de construcción podrán clasificar sus proyectos tempranamente y obtener el comportamiento tendencial de su flujo de caja en función de los comportamientos típicos detectados en este análisis.

## 7. Taxonomía de los proyectos de construcción en base a su flujo de fondos

Tabla 23, Método de regresión múltiple para los mejores sub conjuntos de flujos de caja

R <sup>2</sup>	0/10t	1/10t	2/10t	3/10t	4/10t	5/10t	6/10t	7/10t	8/10t	9/10t	10/10t
48.81				X							
44.27					X						
75.23				X			X				
72.51				X				X			
78.14				X	X		X				
77.75				X	X			X			
81.13				X	X		X		X		
80.88				X	X				X	X	
84.73				X	X		X		X		X
82.42			X	X	X				X	X	
89.22				X	X		X		X	X	X
88.11			X	X	X		X		X		X
91.13			X	X	X		X		X	X	X
90.47		X		X	X		X		X	X	X
92.38			X	X	X	X	X		X	X	X
91.10		X	X	X	X		X		X	X	X
95.73		X	X	X	X	X	X		X	X	X
94.52		X	X	X	X		X	X	X	X	X
96.17		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
96.02	X	X	X	X	X		X	X	X	X	X
98.96	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X

Continuando con el criterio anterior, entonces, los nuevos proyectos pertenecerán a uno de los flujos de caja determinados como típicos cuando sus valores se encuentran dentro del intervalo de la confianza al 95% de las métricas claves determinadas, ver la Tabla 24.

Tabla 24, Métricas para la clasificación de nuevos proyectos en las taxonomías determinadas

Variables	LCS				LCI			
	C1	C2	C3	C4	C1	C2	C3	C4
3/10t (%)	11.94	11.03	10.63	9.87	11.21	10.74	9.98	9.42
6/10t(%)	10.78	11.25	10.32	9.92	10.45	10.89	9.99	9.73

## 7.6 FASE DE VALIDACIÓN

Esta etapa tiene como objetivo validar las taxonomías del flujo de caja de proyectos de construcción obtenidos en los análisis previos y poder verificar si es posible clasificar nuevos proyectos con las métricas que fueron seleccionadas.

7. Taxonomía de los proyectos de construcción en base a los flujos de fondos

---

Para la clasificación de un nuevo proyecto en el conjunto de conglomerados de flujos de caja, se consideró el par de indicadores que mayor capacidad predictiva tienen sobre el indicador ES 3/10t y 6/10t. Asimismo, para esta etapa se consideró una base de datos adicional con 12 nuevos proyectos de construcción independientes de la base de datos original con la cual se crearon los conglomerados de flujos de caja. Es así, que estos nuevos 12 proyectos de construcción se clasificaron teniendo en cuenta las marcas de la Tabla 24. A modo de ejemplo, el proyecto de construcción de la base de datos de validación OV4 tiene los siguientes valores para los décimos principales del flujo de caja: 3/10t = 10.01% y 6/10t = 10.44%, Tabla 25.

Usando la Tabla 24, podemos deducir que este nuevo proyecto pertenece al grupo de flujos de efectivo C3. Esta clasificación se realizó para los 12 nuevos proyectos pertenecientes a la base de datos de validación. Los resultados se pueden ver en la Tabla 25.

Tabla 25, Base de datos de validación de flujos de caja.

Proyecto de construcción	Variables de clasificación de flujo de caja		Conglomerado asignado
	3/10t	6/10t	
OV1	11,92	10,71	C3
OV2	9,51	9,86	C4
OV3	9,65	9,79	C4
OV4	10,01	10,44	C3
OV5	9,76	9,80	C4
OV6	11,84	10,70	C3
OV7	10,84	10,80	C2
OV8	11,63	11,12	C1
OV9	11,23	10,77	C3
OV10	11,27	10,57	C3
OV11	11,21	10,60	C3
OV12	9,51	9,74	C4

Luego del proceso de clasificación, se puede decir que los 12 nuevos proyectos se pudieron clasificar en la taxonomías propuesta y el uso de las métricas definidas se ha validado con éxito. Ha sido posible clasificar los nuevos proyectos en uno de los cuatro comportamientos típicos. Por lo tanto, el método de clasificación se puede utilizar como una herramienta de gestión para determinar la pertenencia de un nuevo proyecto de construcción a las taxonomías de

tendencias de comportamiento presentadas aquí. De esta manera, los gerentes pueden usar los resultados para tener una visión general del comportamiento financiero y las tendencias futuras de sus proyectos de construcción en curso.

## 7.7 RELACIÓN ENTE COMPORTAMIENTO DE TIEMPOS DE EJECUCIÓN Y FLUJO DE FONDOS

Para determinar la correlación entre el estudio realizado en el Capítulo 6 que tiene como resultado la taxonomía de comportamiento de los cronogramas físicos y los resultados obtenidos en este capítulo, se realizó primero una asimilación en base a la lógica.

El grupo de proyectos de construcción que finalizan con menos retrasos se le asimiló, primariamente, con el grupo de proyectos de flujos de caja que requieren menor cantidad de dinero extra. Esto es debido a que se entiende que los proyectos que no requieren mayores tiempos de construcción de lo previsto, no requerirán tampoco mayores sobrecostos de los planificados, no requieren mantenimiento de costes fijos por tiempo que no fue previsto ni otros gastos adicionales, en principio.

Por otro lado, el conjunto de cronogramas que agrupan todos los proyectos que sufren retrasos desde el principio y completan el trabajo con paradas parciales o totales, produciendo considerables retrasos en el tiempo programado (> 100%), se asemejaron con el conjunto de flujo de caja que requieren mayores sobrecostos para terminar los proyectos. Esto se determinó sobre el entendido que los proyectos que sufren retrasos, enlentecimientos o incluso detenimientos parciales o totales de las obras, requieren en general una mayor infusión de dinero para solventar los gastos fijos durante estos periodos no planeados. Además de que podrán requerir capital extra para la contratación de nueva mano de obra (no planificada en los flujos de caja originales) con el objetivo de retomar el ritmo de construcción y poder finalizar las tareas.

Finalmente, los dos grupos intermedios se emparejaron siguiendo el mismo criterio, el grupo que presenta mayor retraso en los cronogramas de obra de los

## 7. Taxonomía de los proyectos de construcción en base a los flujos de fondos

proyectos de construcción e asimiló al cronograma de flujo de caja con mayor infusión de dinero extra no planificada y viceversa.

De esta manera, se han asimilado grupos pertenecientes a ambos estudios, principalmente, considerando los criterios de retraso o demoras y los mayores costes requeridos en las ejecuciones.

Para la validación estadística de estas correlaciones iniciales supuestas por la lógica se utilizaron las métricas de clasificación propuestas en la Tabla 14 y Tabla 24 de ambos estudios. Estas métricas fueron aplicadas sobre la base de datos de 12 nuevos proyectos de construcción, Tabla 17 y Tabla 18. Los resultados se pueden ver en la Tabla 26 en donde la clasificación de la base de datos de validación fue realizada para ambas taxonomías propuestas.

Tabla 26, Clasificación de base de datos de validación en ambas taxonomías

Proyectos	Métricas flujo de caja		Conglomerado asignado	Métricas cronogramas de obra			Conglomerado asignado
	3/10t	6/10t		3/10t	4/10t	6/10t	
OV1	11,92	10,71	C3	5,77	9,22	9,27	C2
OV2	9,51	9,86	C4	10,11	11,22	11,10	C3
OV3	9,65	9,79	C4	10,96	10,98	11,42	C3
OV4	10,01	10,44	C3	6,91	7,28	8,53	C2
OV5	9,76	9,80	C4	10,65	11,14	11,40	C3
OV6	11,84	10,70	C3	8,90	7,34	9,66	C2
OV7	10,84	10,80	C2	5,88	4,85	8,174	C1
OV8	11,63	11,12	C1	4,78	6,10	7,160	C1
OV9	11,23	10,77	C3	5,71	7,27	9,63	C2
OV10	11,27	10,57	C3	7,83	8,90	8,85	C2
OV11	11,21	10,60	C3	6,79	7,65	9,14	C2
OV12	9,51	9,74	C4	10,24	11,73	11,86	C3

Cabe señalar que el 100% de los proyectos que pertenecen al clúster C4 de flujo de caja pertenece al clúster de cronogramas C3. De manera similar, existe una coincidencia total entre los proyectos de validación estudiados para los flujos de caja C2 y los grupos de cronogramas C3.

Es necesario remarcar que, para recabar datos de validación, fue más difícil el acceso a cronogramas con retraso, debido a que las empresas constructoras no están dispuestas por completo a revelar las pérdidas monetarias que sufrieron, sin importar la confidencialidad de los datos. Es por ello que los datos de



validación para proyectos de construcción con grandes retrasos o desviaciones de los programas financiero de importancia no fueron validados por completo. Únicamente se contó con acceso a datos de los proyectos de construcción OV7 y OV8, de los cuales uno se clasificó como C1 y el otro como C2 para los flujos de caja, y ambos se clasificaron como C1 para los grupos de cronogramas. A pesar de que no fue posible asemejar el 100% de la base de datos de validación bajo los supuestos de semejanza de conglomerados que se propusieron, si se puede deducir que:

- El conglomerado C4 de flujos de caja y el conglomerado C3 de cronogramas tienen un 100% de coincidencia. Indicando que los proyectos que terminan a tiempo requieren la menor cantidad de infusión de dinero extra al finalizar el proyecto. Es decir que los proyectos que requieren más del doble del tiempo planificado de obra requieren más del 27% del dinero planificado para sustentar estos retrasos.
- El conglomerado C3 de flujos de caja y el conglomerado C2 de cronogramas también tienen una coincidencia del 100%. Indicando que los proyectos que sufren retrasos en obra (pero no detenimientos), es decir los que sufren desviaciones moderadas del cronograma original, deben aportar al menos un 7% extra de dinero al previsto originalmente para sustentar estos retrasos.
- Los conglomerados C1 y C2 de flujos de caja fueron asimilados al conglomerado C1 de cronogramas, indicando que los proyectos que suelen sufrir mayores retrasos, requieren mayores infusiones de dinero para sobrellevar esta situación.

Se puede decir que la relación potencial entre la taxonomía de flujo de caja y la taxonomía de cronogramas de ejecución se ha demostrado en la mayoría de los casos, pero es necesario recopilar más datos para garantizar la correlación propuesta desde un punto de vista estadístico. Las correlaciones, primeramente, determinadas en base a la lógica y validadas mediante la clasificación de 12 proyectos fue graficada en las Figura 31, Figura 32, Figura 33 y Figura 34.

En estas graficas se puede ver cómo interactúan los costes financieros de la obra en relación al desempeño del avance físico de las mismas y pueden servir

7. Taxonomía de los proyectos de construcción en base a los flujos de fondos

como guía para los gestores de proyectos para determinar potenciales relaciones entre los gastos a afrontar en función de las tendencias de comportamiento de sus cronogramas de obra.

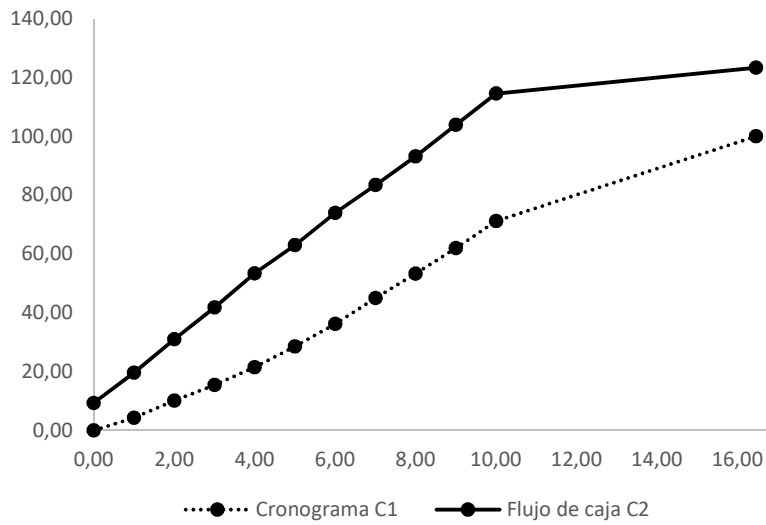


Figura 31, Correlación entre conglomerado C1 de cronograma y conglomerado C2 de flujo de caja

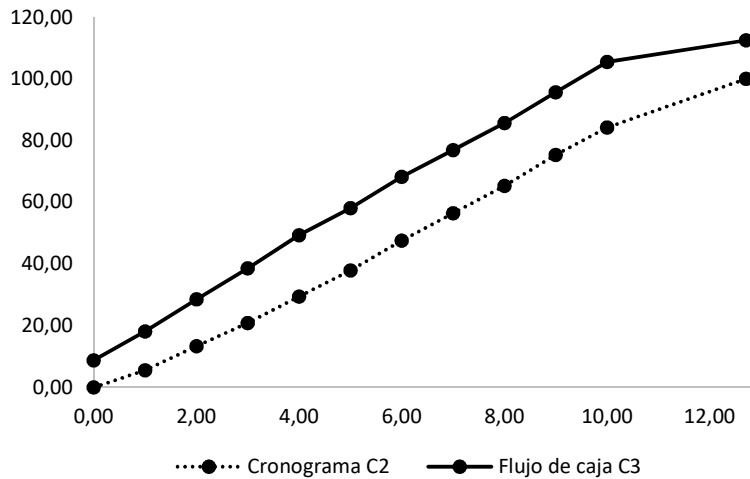


Figura 32, Correlación entre conglomerado C2 de cronograma y conglomerado C3 de flujo de caja

7. Taxonomía de los proyectos de construcción en base a su flujo de fondos

---

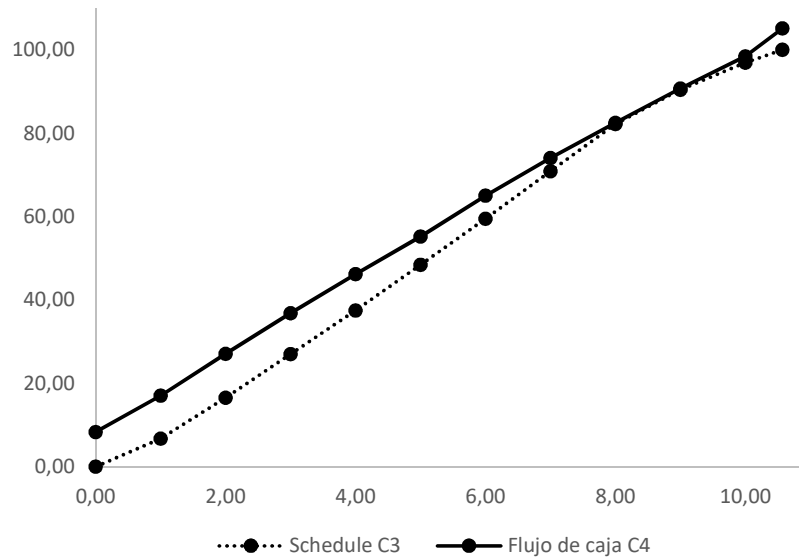


Figura 33, Correlación entre conglomerado C3 de cronograma y conglomerado C4 de flujo de caja

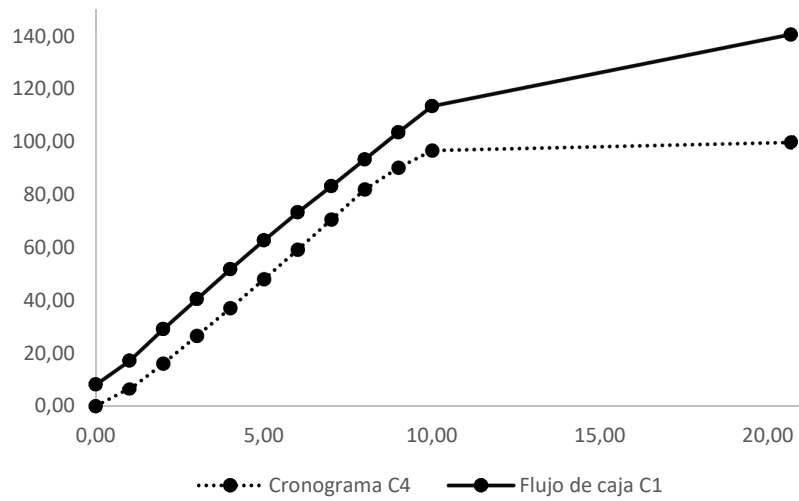


Figura 34, Correlación entre conglomerado C4 de cronograma y conglomerado C1 de flujo de caja

Adicionalmente al estudio de correlación entre ambos estudios, se llevó a cabo un estudio exploratorio adicional para determinar las fases principales que abarcan a cada uno de los décimos estudiados. Para cada uno de los datos de los 90 proyectos de construcción de cronogramas de obra y de los 82 flujos de caja se realizó una clasificación uno a uno de cada uno de los décimos indicando el rubro principal que se estaba ejecutando en ese momento. Luego se analizó la globalidad de los resultados obtenidos y se determinaron a grandes rasgos las fases principales que cada uno de los décimos de ambas taxonomías representa.

Este ejercicio, tiene como objetivo que el director de obra o el gestor del diseño del proyecto pueda definir fácilmente cada una de las etapas de la obra. Más aún, permite diferenciar fase por fase los gastos que serán requeridos y los porcentajes de avance de obra que la fase tendrá como resultado, Tabla 27.

De este modo se puede apreciar de un modo simple la correlación ente los avances del cronograma de obra y el flujo financiero, que proporciona a los gestores una idea de no solo como se comportarán las proyecciones de ejecución de obra de sus proyectos, sino se puede tener una estimación de los gastos futuros que deberán tener para mantener esas proyecciones. Más aún, con la clasificación en etapas de ejecución se puede mantener el control de las etapas de ejecución que en cada décimo se deben desarrollar.

Es importante destacar que los conglomerados se diferencian sustancialmente en las etapas de ejecución de obra, mientras algunos conglomerados están finalizando las etapas de implantación, otros recién se encuentran por la mitad del trabajo de las mismas. Otros casos requieren despidos o reducción del personal para poder terminar las tareas programadas.

7. Taxonomía de los proyectos de construcción en base a su flujo de fondos

Tabla 27, Fases de construcción para la correlación entre cronogramas de obra y cronogramas financieros

Variable	C1	C4	Fase de construcción	C2	C1	Fase de construcción
	Flujo de caja	Cronograma		Flujo de caja	Cronograma	
0/10t	8,36	-	Implantación	9,32	-	Implantación
1/10t	8,92	5,57		10,28	4,32	
2/10t	11,94	7,83	Fundación	11,38	5,84	Fundación
3/10t	11,37	4,53		10,85	5,25	
4/10t	11,27	8,57		11,56	6,03	
5/10t	10,98	8,42	Compra de suministros y construcción en general	9,61	7,09	Compra de suministros y gastos fijos
6/10t	10,61	5,68		10,92	7,72	Re abastecimiento
7/10t	9,89	8,9		9,53	8,76	Terminaciones
8/10t	10,04	8,79		9,71	8,29	
9/10t	10,29	10,03		10,81	8,73	
10/10t	9,91	8,96	Enlentecimiento	10,63	9,27	
ES%	27,08	106,74	Finalización	8,74	64,57	Finalización

Variable	C3	C2	Fase de construcción	C4	C3	Fase de construcción
	Flujo de caja	Cronograma		Flujo de caja	Cronograma	
0/10t	8,84	-	Implantación	8,35	-	Implantación
1/10t	9,32	5,57		8,7	6,75	
2/10t	10,49	7,83	Fundación	10,07	9,77	Fundación
3/10t	10,02	7,53		9,75	10,5	
4/10t	10,72	8,57		9,32	10,44	
5/10t	8,78	8,42	Compra de suministros y gastos fijos	9,03	10,95	Compra de suministros y gastos fijos
6/10t	10,11	9,68	Re abastecimiento	9,82	11,09	Re abastecimiento
7/10t	8,69	8,9		9,05	11,4	
8/10t	8,78	8,79	Terminaciones	8,47	11,34	Terminaciones
9/10t	9,93	10,03		8,2	8,21	
10/10t	9,79	8,96		7,7	6,49	
ES%	7,03	27,08	Finalización	6,69	5,7	Finalización

## 7.8 CONCLUSIONES

Si bien hay algunos estudios sobre el comportamiento financiero en los proyectos de construcción y la previsión de flujo de efectivo, es difícil encontrar en la literatura un modelo unificado para la toma de decisiones que abarque un comportamiento tendencial generalizado de los flujos de caja. En la literatura se han encontrado varios modelos estadísticos de predicción de flujo de caja basados en indicadores relevantes que cada autor propone, pero que no proporcionan una visión integral del comportamiento financiero del proyecto.

En este capítulo se consigue una taxonomía de proyectos de construcción en base a sus comportamientos de flujo de caja. Para lograr la taxonomía se ha seguido una metodología similar a la del Capítulo 6, partiendo de la elección de unas bases de datos de proyectos reales para finalizar con un método para clasificar nuevos proyectos en la taxonomía previamente definida.

La primera fase de esta metodología consistió en la recopilación y estudio de las bases de datos que se utilizaron en los estudios. De este modo se estudiaron dos bases de datos, una compuesta por 82 proyectos de construcción cuyos flujos de caja fueron analizados y una segunda base de datos de 12 proyectos de construcción de validación de la cual se conocen no solo los flujos de caja sino los cronogramas de ejecución de obra. Esta base de datos fue utilizada no solo para la validación de las taxonomías propuestas y para la validación de las métricas de clasificación, sino que también se utilizó para determinar la potencial correlación entre los estudios de taxonomías de cronogramas de obra y de flujos de caja que se proponen en esta tesis.

Se desarrolló además un estudio estadístico basado en análisis de conglomerados para determinar la taxonomía de comportamiento de los flujos de caja. Del estudio se puede concluir que existen cuatro tipos de comportamientos de los flujos:

(1) En algunos proyectos de construcción, el 17% del capital total se emite en la etapa de fundación (iniciación), y el resto del dinero se distribuye uniformemente durante el período de construcción previsto. Estos tipos de

proyectos tienen un bajo riesgo de des financiación y logran completar la construcción con una infusión de dinero adicional inferior al 5% del total del capital previsto.

(2) Los proyectos en los que aproximadamente el 18% del capital previsto se gasta en la etapa de fundación, pero se producen retrasos y, como resultado, necesitan una inversión adicional en torno al 10% del total del capital previsto.

(3) Proyectos en los que se producen imprevistos en la etapa de la fundación y, por lo tanto, se gasta alrededor del 33% del presupuesto para cubrir la etapa y poder continuar con la construcción. Estos proyectos requieren una infusión adicional de capital en torno al 23%, y el trabajo se termina con retraso debido a la falta de suministros que se deben afrontar como consecuencia de la falta de financiación.

(4) Finalmente, en algunos proyectos, más del 34% del presupuesto debe gastarse en la etapa de la fundación debido a eventos imprevistos, problemas con la previsión de implantación de obra y/o por debido al cambio de fundación por malos estudios previos. Estos proyectos comienzan a quedarse sin fondos cuando el progreso de la construcción físico es del 70%, lo que retrasa el plazo previsto para terminar el trabajo aún más.

Más aún, mediante el uso de la técnica de mejores sub conjuntos se determinaron las variables 3/10t y 6/10t como predictores principales para la clasificación de nuevos proyectos en las taxonomías propuestas. De este modo los gestores de proyectos podrán identificar los comportamientos tendenciales de sus flujos de caja y prever futuros desembolsos basados en los comportamientos típicos que suelen tener los proyectos de construcción que siguen caminos similares al suyo. Finalmente, se realizó un estudio de correlación en busca de similitudes de comportamiento entre ambos estudios de taxonomías realizados en esta tesis. Cabe señalar que el 100% de los proyectos que pertenecen al clúster C4 de flujo de caja pertenece al clúster de cronogramas C3. De manera similar, existe una coincidencia total entre los proyectos de validación estudiados para los flujos de caja C2 y los grupos de cronogramas C3.





# 8. HERRAMIENTA ESTADÍSTICA PARA LA PREDICCIÓN DEL AVANCE DE PROYECTOS DE CONSTRUCCIÓN

---

## 8.1 INTRODUCCIÓN

Finalmente, y para acompañar al estudio de taxonomías de los cronogramas de proyectos de construcción se buscó realizar un modelo predictivo que permitiera conocer el porcentaje de avance futuro en función de los avances pasados con el fin de que los gestores de proyecto puedan tener una herramienta de predicción a corto plazo diferente a la que proporciona la comparación de taxonomías (que proporciona una visión más global del comportamiento del proyecto de construcción).

Consecuentemente, se ha diseñado también un modelo predictivo para calcular el avance siguiente en una obra utilizando herramientas estadísticas más apropiadas para la predicción de comportamientos futuros basados en comportamientos pasados. Para este fin el uso de las Cadenas de Markov es altamente recomendable.

Por lo tanto, por un lado, la definición de taxonomías permite tener una idea global de las tendencias de comportamiento de los proyectos de construcción, tanto para los cronogramas como para los flujos de caja. Las taxonomías determinadas pueden ser utilizadas por los proyectistas para elegir los caminos más beneficiosos que se deberían seguir los proyectos de construcción con el fin que sufran el menor retraso posible.

Asimismo, durante el proceso de obra estas mismas taxonomías puede dar una idea a los gestores de proyecto del curso futuro de su proyecto en función de las tendencias normales de comportamiento de otros proyectos similares. Pudiendo advertir de desviaciones antes de que las mismas ocurran.

Sin embargo, y a pesar de la gran utilidad que el conocimiento de posibles desviaciones, se considera de interés poder dimensionar el avance futuro cercano con la mayor precisión posible. Conocer el pronóstico de avance en función de los avances pasados, permite al gestor, que ya tiene una idea global del desarrollo futuro de su proyecto, poder predecir el avance físico del décimo siguiente.

Conociendo el avance físico de los décimos subsiguientes el gestor de proyecto será además capaz de tener una noción del ingreso monetario que este avance de obra implicará (dado que en los proyectos de construcción los pagos se realizan en función de los avances físicos del cronograma). De este modo podrá estimar no solo cuánto es el avance físico sino cuánto serán los ingresos en los próximos meses con una precisión mayor.

El conocimiento de los avances físicos de los décimos subsiguientes proporciona una herramienta de predicción más ajustada al día a día de desarrollo del proyecto, mientras que las taxonomías proporcionan una predicción más global del comportamiento del mismo. Ambas herramientas conforman un grupo de modelos estadísticos que permiten a los gestores de proyectos tomar decisiones acertadas en base a pronósticos confiables.

Es por ello que durante este capítulo se muestra el desarrollo de una metodología para determinar el avance de cada uno de los décimos del tiempo previsto teniendo en cuenta el avance de los décimos anteriores.

## 8.2 METODOLOGÍA

Análogamente al caso de la utilización de análisis de conglomerados, para la generación del modelo de predicción en base a cadenas de Markov se deben tener en cuenta los aspectos formales de conversión de cronogramas a décimos del tiempo previsto.

Dado que todos los proyectos tienen diferentes tiempos de construcción, para estandarizar y comparar datos, los valores del tiempo estimado de finalización deben ser discretizados. El tiempo de construcción previsto se considerará más de 10 partes iguales, diez décimos debido a que se trabajará con cronogramas de avances físicos de obra.

Al hacer esto, se pueden comparar dos proyectos con diferentes tiempos de construcción, ya que lo que se compara es el porcentaje de progreso hasta un cierto tiempo. Para la construcción del modelo,  $x_t$  indica el estado de un proyecto de construcción en el momento  $t$ . Esto define un proceso estocástico que corresponde a la secuencia  $x_1, \dots, x_{10}$ .

El proceso estocástico que se define representa el porcentaje de progreso gradual en forma porcentual de un décimo del tiempo previsto al siguiente, donde el valor de  $x_t$  generalmente se basa en los valores anteriores en la secuencia  $x_{t-1}$ . A medida que pasa el tiempo, los cambios de estado ocurren en términos probabilísticos y se representan a través de las probabilidades de transición de estado. Las hipótesis contempladas en el modelo markoviano para este proceso estocástico son:

1. Hay un número finito de estados que describen el comportamiento de los proyectos de construcción. Para el modelo de predicción, hay 9 estados de transición entre los 10 décimos del tiempo previsto en un proyecto de construcción y un estado de transición adicional para predecir el valor del indicador ES cuando se conoce el comportamiento del décimo número 10, es así que se totalizan 9 matrices para la transición entre los 10 estados y una adicional para la determinación de ES, total 10 matrices de transición.
2. Hay una distribución conocida de probabilidades al comienzo de la proyección del estudio ( $t = 1$ ). Esta distribución se basa en las probabilidades de avance futuro determinadas a partir de la base de datos.
3. La transición de un estado actual a uno futuro solo depende del estado actual (propiedad Markoviana). Esto significa que el avance de obra del décimo  $x_{n+1}$  está influenciado por el avance de obra realizado en el décimo  $x_n$ . Este modelo incluirá matrices de transición entre los décimos del tiempo previsto,

bajo el entendido que lo que sucedió en el décimo actual influirá en el décimo futuro.

Entonces, el método para predecir los avances mensuales incrementales en porcentaje de obra mediante la utilización de cadenas de Markov consiste en la construcción de 10 matrices de transición entre los estados  $t$  y  $t+1$  en función de la base de datos del comportamiento de 90 proyectos de construcción de la base de datos. La base de datos que se utilizará es la misma que en el Capítulo 6 y está compuesta por proyectos de construcción de mediano a gran porte de los que se conoce sus cronogramas de avances físicos.

En las filas y columnas de esta matriz se considera un avance incremental de un periodo de estudio al siguiente de un 1%. Se ha seleccionado este valor arbitrario bajo el entendido que de un décimo a otro los proyectos de construcción suelen avanzar entre un 2 y un 4%. Un avance incremental de 1% en las matrices de transición permite interpolar entre los valores y obtener datos más precisos en caso de que sea necesarios.

Asimismo, se entiende que trabajar con valores incrementales menores a 1% haría que las matrices de transición crezcan en dimensiones, haciendo que el método sea de un uso más complejo para el usuario. A modo de ejemplo, en el lugar  $p_{2-3\%/0-1\%}^{(m)}$  de la matriz de transición  $P^{(m-1)}$  se encuentra la probabilidad de que en el décimo de avance  $m$  una obra avance entre un 2 y un 3% cuando la misma ha avanzado entre 0 y 1% en el décimo  $m - 1$ , como se muestra en la Ecuación (38).

Cabe mencionar que para la matriz de transición  $P^{(10)}$  que predice el valor en porcentaje de indicador ES no se consideran incrementales del 1%, sino que se consideran incrementales del 8% buscando cubrir el rango de valores del indicador que se muestran en la Tabla 3. Esta tabla presenta los valores medios de la base de datos presentada en el Capítulo 6 y en dónde se puede ver que los valores máximos del indicador ES llegan hasta 120%. De este modo se puede construir una matriz cuadrada de 16x16 que sea utilizable con las matrices de transición entre estados.

$$P^{(m-1)} = \begin{array}{c|ccc} \text{Estado} & 0-1\% & \dots & 15-16\% \\ \hline 0-1\% & P_{0-1\%/0-1\%}^{(m)} & \dots & P_{15-16\%/0-1\%}^{(m)} \\ 1-2\% & P_{0-1\%/1-2\%}^{(m)} & \dots & P_{15-16\%/1-2\%}^{(m)} \\ 2-3\% & P_{0-1\%/2-3\%}^{(m)} & \dots & P_{15-16\%/2-3\%}^{(m)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 15-16\% & P_{0-1\%/15-16\%}^{(m)} & \dots & P_{15-16\%/15-16\%}^{(m)} \end{array} \quad (38)$$

Posteriormente para predecir el comportamiento de un nuevo proyecto de construcción utilizando las matrices de transición, basta con conocer el porcentaje de avance incremental en uno de los décimos para poder predecir el del siguiente décimo con la matriz de transición correspondiente.

Por ejemplo, conociendo el avance incremental porcentual de un proyecto en su décimo actual número 4, se podrá predecir el avance porcentual incremental del décimo 5 mediante la utilización de la matriz de transición  $P^{(4)}$  y el avance conocido. Si el avance incremental al décimo 4 del proyecto de construcción se encuentra por ejemplo entre 2 y 3 %, la predicción de avance para el décimo 5 se obtiene como el promedio ponderado ente la fila 3 de la matriz de transición  $P^{(4)}$  y el vector (1x16) de la Ecuación (39) que contiene el punto medio del avance incremental de cada uno de los intervalos n considerados en el método.

$$(1,5\% \quad 2,5\% \quad 3,5\% \quad \dots \quad 15,5\%) \quad (39)$$

Para el caso de querer determinar el indicador ES a partir de la matriz de transición  $P^{(10)}$ , se multiplica la fila correspondiente al avance mensual del décimo número 10 con el vector (1x16) de la Ecuación (40).

$$(4\% \quad 12\% \quad 20\% \quad \dots \quad 124\%) \quad (40)$$

### 8.3 MODELO DE PREDICCIÓN EN BASE A CADENAS DE MARKOV

Se construyeron 10 matrices de transición para la base de datos de cronogramas de obra utilizada en el Capítulo 6, con el fin de predecir el comportamiento futuro de las desviaciones de la programación y validar el método de pronóstico presentado. El método propuesto permite predecir el

porcentaje de progreso gradual en una décima conociendo el avance de la décima anterior y la matriz de transición correspondiente.

Las matrices de transición obtenidas se muestran en el Apéndice D. En cada una de estas matrices se muestra la probabilidad de transición ente un estado a otro basados en el comportamiento de las 90 obras estudiadas. Las probabilidades de transición fueron calculadas teniendo en cuenta la base de dato.

Para cada uno de los porcentajes de avance incremental del presente se determinó cuántos de los 90 proyectos de construcción caen en la zona del 1% incremental del futuro. De este modo se determina la probabilidad de transición. Por ejemplo, si para el avance incremental de ente 1 y 2% presente se tienen 23 proyectos de construcción que tienen un avance incremental del 4 al 5% en el décimo futuro, la probabilidad de transición  $P_{3-4\%/1-2\%}^{(m)}$  será 23/90, resultando en un 0,256.

Posteriormente se consideraron 12 obras adicionales, también utilizadas en el capítulo 6, con el objetivo de validar la metodología propuesta. Se cuenta con el cronograma previsto de 12 nuevos proyectos de construcción de los cuales se conocen los avances reales porcentuales incrementales en cada décimo. Con estos datos se ha realizado la predicción de avance mensual utilizando las matrices de Markov correspondiente para cada estado.

A modo de ejemplo se ilustra la validación realizada para una de las 12 obras de verificación utilizando la matriz de transición P(1) entre el avance porcentual incremental en el primer decimo y el segundo decimo de obra. Consideremos entonces la matriz de transición P(1) que se muestra en el Anexo D. Consideremos además los valores de avances reales obtenidos por las 12 obras de verificación O1, O2, O3, ..., O12 en el primer décimo de cada una de las obras, como se muestra en la Tabla 28.

Tabla 28. Avances reales porcentuales incrementales al primer décimo de las 12 cooperativas de verificación.

	O1	O2	O3	O4	O5	O6	O7	O8	O9	O10	O11	O12
1/10t	2,25	4,52	2,94	11,20	1,06	4,46	0,50	0,00	4,76	5,41	8,90	4,74

8. Herramienta estadística para la predicción del avance de proyectos de construcción

Para la obra O1 la predicción de avance al segundo décimo conociendo el avance en el primer décimo de 2,25% se calcula como el promedio ponderado entre la fila 3 de la matriz P(1) (porque el avance del décimo presente se encuentra entre 2 y 3) y el vector de la Ecuación (39), como se puede ver en la Tabla 29.

Tabla 29. Cálculo del pronóstico de avance en el instante  $x_2$  conociendo el avance en el instante  $x_1$  para el proyecto de verificación O1.

Fila 3 (parte 1)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,09	0,09	0,18
Eq. (39) (parte 1)	0,50	1,50	2,50	3,50	4,50	5,50	6,50	7,50
Fila 3 (parte 2)	0,09	0,36	0,00	0,00	0,18	0,00	0,00	0,00
Eq. (39) (parte 2)	8,50	9,50	10,50	11,50	12,50	13,50	14,50	15,50
$x_2$ pronosticado= $0,09 \times 5,50\% + 0,09 \times 6,50\% + 0,18 \times 7,50\% + 0,09 \times 8,50\% + 0,36 \times 9,50\% + 0,18 \times 12,50\% = 8,87\%$								

Entonces conociendo los avances porcentuales incrementales de las 12 cooperativas de verificación para los 10 estados  $x_1, \dots, x_{10}$ , como se muestran en la Tabla 30 y utilizando las 10 matrices de transición del Anexo D se han determinado los valores pronosticados, como se muestra en la Tabla 31.

Tabla 30. Avances reales porcentuales incrementales de verificación para los estados  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_{10}$ .

	O1	O2	O3	O4	O5	O6	O7	O8	O9	O10	O11	O12
1/10t	2,25	4,52	2,94	11,20	1,06	4,46	0,50	0,00	4,76	5,41	8,90	4,74
2/10t	4,68	9,55	9,90	17,81	6,37	5,01	3,28	2,65	9,25	3,80	8,28	17,24
3/10t	9,47	10,39	7,04	17,96	4,66	4,80	6,51	8,21	9,99	13,34	10,12	10,48
4/10t	10,17	6,33	9,08	9,71	4,15	7,97	9,22	10,99	8,91	5,06	13,21	8,15
5/10t	13,71	11,35	11,13	8,72	8,78	8,42	14,32	11,44	9,94	2,13	12,24	13,69
6/10t	11,03	10,31	12,11	8,79	8,67	13,52	12,50	12,24	11,32	6,12	9,49	11,49
7/10t	6,38	9,34	8,69	6,19	4,12	12,31	10,99	4,97	12,61	2,51	10,88	8,05
8/10t	7,47	7,71	5,18	6,80	4,51	10,56	11,18	4,55	9,77	7,84	12,05	10,68
9/10t	8,50	11,55	10,84	3,36	14,73	7,95	12,57	10,78	8,85	13,67	6,69	11,10
10/10t	10,67	14,60	13,97	5,25	6,43	7,60	6,46	13,12	9,13	10,83	0,00	4,07
ES	18,63	13,88	16,66	7,69	22,21	22,78	23,08	25,32	4,16	23,45	11,32	9,10

## 8. Herramienta estadística para la predicción del avance de proyectos de construcción

Tabla 31, Avances pronosticados porcentuales incrementales de los proyectos de verificación para los estados  $x_2$ ,  $x_3$ ,  $x_4$ , ...,  $x_{10}$ .

	O1	O2	O3	O4	O5	O6	O7	O8	O9	O10	O11	O12
2/10t	8,87	6,58	8,95	7,50	6,41	6,58	5,17	5,17	6,58	6,92	8,50	6,58
3/10t	6,75	8,50	8,50	11,50	7,60	6,86	7,25	4,83	8,50	7,25	8,97	11,50
4/10t	9,25	9,68	7,36	12,00	7,00	7,00	6,59	9,75	9,25	12,50	9,68	9,68
5/10t	8,64	7,27	9,70	9,70	6,64	7,00	9,70	8,64	9,57	6,39	15,50	9,57
6/10t	9,50	10,50	10,50	9,80	9,80	9,80	11,50	10,50	9,73	7,00	9,00	9,50
7/10t	9,30	9,94	10,33	10,07	10,07	0,00	10,33	10,33	9,30	8,14	9,88	9,30
8/10t	8,30	8,67	7,86	8,30	5,17	10,75	8,80	5,17	10,75	8,50	8,80	7,86
9/10t	8,90	8,90	9,00	7,19	9,50	10,75	8,88	9,50	8,00	8,90	10,00	10,75
10/10t	8,04	10,00	8,79	0,00	15,50	8,33	10,75	8,79	8,04	11,25	6,07	10,00
ES	15,08	20,00	20,00	19,00	23,33	23,33	23,33	22,00	15,43	15,08	18,00	8,00

Para conocer el grado de precisión con el que el método es capaz de predecir el avance mensual y el indicador ES se determinaron las diferencias porcentuales entre el avance real obtenido por cada proyecto de verificación (para cada uno de los estados estudiados) y los avances pronosticados por este método, es decir que se determinaron las diferencias porcentuales entre los valores de la Tabla 30 y la Tabla 31, que se muestran en la Tabla 32.

En esta tabla se muestran las diferencias porcentuales anteriormente mencionadas, en la fila llamada "Promedios" se muestra el promedio entre los 9 estados de transición que predicen avances mensuales para cada cooperativa de vivienda y en la fila llamada "Promedio total" se muestra en el caso de avances mensuales el promedio de la fila "Promedios" y en el caso del indicador ES el promedio de las diferencias obtenidas para las 12 obras de verificación.



## 8. Herramienta estadística para la predicción del avance de proyectos de construcción

Tabla 32, Tabla resumen de las diferencias entre avances reales y avances pronosticados para las 12 obras de verificación.

	O1	O2	O3	O4	O5	O6	O7	O8	O9	O10	O11	O12
2/10t	4,19	2,97	0,95	10,31	0,04	1,57	1,89	2,52	2,67	3,12	0,22	10,66
3/10t	2,72	1,89	1,46	6,46	2,94	2,06	0,74	3,38	1,49	6,09	1,15	1,02
4/10t	0,92	3,35	1,72	2,29	2,85	0,97	2,63	1,24	0,34	7,44	3,53	1,53
5/10t	5,07	4,08	1,43	0,98	2,14	1,42	4,62	2,80	0,37	4,26	3,26	4,12
6/10t	1,53	0,19	1,61	1,01	1,13	3,72	1,00	1,74	1,59	0,88	0,49	1,99
7/10t	2,92	0,60	1,64	3,88	5,95	12,31	0,66	5,36	3,31	5,63	1,00	1,25
8/10t	0,83	0,96	2,68	1,50	0,66	0,19	2,38	0,62	0,98	0,66	3,25	2,82
9/10t	0,40	2,65	1,84	3,83	5,23	2,80	3,69	1,28	0,85	4,77	3,31	0,35
10/10t	2,63	4,60	5,18	5,25	9,07	0,73	4,29	4,33	1,09	0,42	6,07	5,93
Promedio	2,36	2,37	2,06	3,95	3,33	2,86	2,43	2,58	1,41	3,70	2,48	3,30
Promedio total	2,74											
ES	3,55	6,12	3,34	11,31	1,12	0,55	0,25	3,32	11,27	8,37	6,68	1,10
Promedio total	4,75											

De la validación realizada se puede deducir que en promedio la metodología propuesta para la predicción de avances de obra pronostica el avance con una desviación de 2,74%. Asimismo, esta metodología permite predecir el valor del indicador ES con una desviación de 4,75%.

### 8.4 VALIDACIÓN ESTADÍSTICA CRUZADA DEL MODELO

La estimación del error que tiene el método para medir el avance en un décimo futuro o la desviación total ES podría variar dependiendo de cuáles datos quedan en la base de datos de 90 proyectos de construcción a partir de los cuales se construyen las matrices de transición y cuáles se utilizan como 12 verificadores independientes. Es por ello, que, para darle mayor validez estadística a los resultados de capacidad de predicción obtenidos, se realizó una validación cruzada, que consistió en introducir los 12 proyectos de validación en la base de datos de 90 proyectos y extraer 12 proyectos al azar para repetir el proceso estadístico que fue llevado a cabo.

Según (García, 2005) la validación cruzada consiste en repetir y calcular la media aritmética obtenida de las medidas de evaluación sobre diferentes

particiones. Se utiliza en entornos donde el objetivo principal es la predicción y se quiere estimar que tan preciso es un modelo que se llevará a cabo. En los capítulos anteriores, en lugar de llevar a cabo validaciones cruzadas, se realizaron validaciones con bases de datos externas a los proyectos de construcción. En este caso en particular, en donde la precisión de la predicción del siguiente décimo toma más relevancia se decidió realizar una validación cruzada con el objetivo de verificar la estabilidad del sistema de predicción dentro de los entornos aceptables.

Según (Schneide, 1997) el método de validación cruzada proviene del método de retención o holdout-method. Este método consiste en dividir en dos conjuntos complementarios los datos de muestra, realizar el análisis de un subconjunto (denominado datos de entrenamiento o training set), y validar el análisis en el otro subconjunto (denominado datos de prueba o test set), de forma que la función de aproximación sólo se ajusta con el conjunto de datos de entrenamiento y a partir del mismo se calcula estimación realizada que puede depender en gran medida de cómo es la división entre datos de entrenamiento y de prueba. Es por ello que aparece el concepto de validación cruzada.

Para este estudio se realizó una validación cruzada de K iteraciones o K-fold cross-validation, en donde los datos de muestra se dividen en K veces en juegos de subconjuntos (cada juego de subconjuntos compuestos por: 12 proyectos para la verificación y 90 proyectos para la base de datos a analizar), con  $K=3$ . Entonces, el subconjunto obtenido aleatoriamente con mayor cantidad de datos de cada división se utiliza como datos de prueba y las restantes 12 obras como datos de entrenamiento. El proceso de validación cruzada es repetido durante las 3 iteraciones, y finalmente se realiza la media aritmética de los resultados de cada iteración para obtener un único resultado.

En las Tabla 33 y Tabla 34 se muestran las diferencias porcentuales entre los valores obtenidos mediante la predicción del comportamiento de obra y el comportamiento real de las mismas (para las dos validaciones cruzadas realizadas).

8. Herramienta estadística para la predicción del avance de proyectos de construcción

Si tomamos en cuenta entonces la Tabla 32, Tabla 33 y Tabla 34, podemos decir que en promedio el método estadístico de predicción tiene una diferencia con la realidad de 2,38%.

Tabla 33, Resumen de las diferencias entre avances reales y avances pronosticados para las obras de verificación – validación cruzada II

	O81	O34	O72	O44	O74	O35	O86	O69	O15	O73	O42	O62
2/10t	2,72	3,32	2,22	3,28	1,72	5,15	2,45	3,47	0,37	1,43	2,23	1,13
3/10t	3,20	3,45	4,98	0,47	0,82	0,44	0,64	2,48	5,45	0,48	0,92	1,43
4/10t	1,29	1,74	2,77	0,61	2,60	1,70	0,28	3,15	1,72	1,11	1,39	0,50
5/10t	3,76	3,19	1,25	0,28	0,13	1,54	1,03	3,15	2,41	1,12	3,00	1,25
6/10t	6,62	2,91	0,04	3,50	2,48	4,85	2,26	1,00	6,19	1,25	4,98	0,82
7/10t	5,55	2,28	0,51	4,67	2,21	1,00	0,69	1,38	2,65	3,56	3,15	2,42
8/10t	5,28	1,38	3,68	1,75	3,03	0,01	2,40	0,18	3,71	0,73	0,27	1,12
9/10t	0,89	4,14	2,39	4,08	5,13	1,31	3,66	2,78	2,69	2,16	0,20	2,21
10/10t	4,07	0,02	2,22	0,96	5,90	0,10	1,53	1,96	0,16	0,69	4,18	7,52
Promedios	3,71	2,49	2,23	2,18	2,67	1,79	1,66	2,17	2,82	1,39	2,26	2,04
Promedio	2,28											
ES	2,00	8,43	5,43	1,43	5,09	0,92	3,17	2,17	1,33	4,07	3,50	5,18
Promedio	3,56											

Tabla 34, Resumen de las diferencias entre avances reales y avances pronosticados para las obras de verificación – validación cruzada III

	O52	O57	O63	O13	O14	O19	O65	O04	O37	O78	O87	O15
2/10t	3,49	3,11	0,58	5,77	0,59	2,64	0,13	2,21	3,19	1,25	2,67	0,86
3/10t	1,35	3,23	2,55	2,69	5,57	1,23	1,83	1,88	1,04	2,16	5,06	1,13
4/10t	0,79	2,03	2,67	1,42	0,17	2,33	0,68	0,99	2,17	1,41	0,60	1,03
5/10t	0,66	0,36	0,29	0,76	0,29	2,11	2,53	2,51	4,01	0,96	3,80	2,67
6/10t	1,19	1,33	0,82	0,26	0,69	2,85	2,13	0,90	0,02	1,41	2,04	3,20
7/10t	1,12	3,90	0,43	5,42	0,68	0,06	1,33	1,34	0,30	0,64	7,53	1,12
8/10t	0,48	2,94	2,28	9,68	0,82	1,52	3,83	0,60	0,00	2,14	2,41	0,53
9/10t	2,23	6,19	4,23	2,82	0,73	0,35	1,29	4,17	6,41	1,54	0,06	3,46
10/10t	5,60	5,14	1,98	6,50	1,15	0,36	1,68	3,00	1,77	4,85	2,84	0,26
Promedios	1,88	3,14	1,76	3,92	1,19	1,50	1,71	1,96	2,10	1,82	3,00	1,59
Promedio	2,13											
ES	2,90	3,26	6,98	7,31	8,43	6,15	2,58	1,33	2,89	5,67	3,65	3,65
Promedio	4,57											

Asimismo, en promedio (de las tres iteraciones de la validación cruzada) se ha obtenido una desviación en la predicción del ES de 4,29%.

El poder predecir con mayor certeza los avances futuros y el indicador ES permite gestionar la obra de un modo más eficiente y proporciona la posibilidad de corregir desviaciones con antelación.

## 8.5 CONCLUSIONES

Utilizando la base de datos de 90 proyectos de construcción con sus cronogramas de obra del Capítulo 6 se ha desarrollado un modelo estadístico que permite predecir los avances futuros de la obra conociendo el comportamiento pasado de la misma y que mediante la utilización de Cadenas de Markov. La predicción de futuros comportamientos tiene un error porcentual del 2,38%, significativamente menor que cuando se utilizan las taxonomías de clasificación de proyectos de construcción (3,54%). Esta diferencia porcentual del 1,16% en la predicción puede marcar una diferencia a la hora de la toma de decisiones.

Más aún, el error para la predicción de la desviación total del tiempo de obra (índice ES) fue de un 4,29%. Este modelo estadístico ha sido validado mediante la utilización de 12 nuevas cooperativas y más aún, fue realizada una validación cruzada de tres iteraciones con resultados similares.

El método estadístico presentado permite mejorar la gestión de las obras ya que predice las desviaciones futuras de cronogramas con mínimos errores y determina la desviación total de obra con una gran precisión.

## 9. RESUMEN FINAL Y CONCLUSIONES

---

### 9.1 RESUMEN

La provisión eficiente de los servicios de infraestructura es uno de los aspectos más importantes de las políticas de desarrollo. A pesar del lugar fundamental que ocupa en el sistema económico la dotación de infraestructuras, y sobre todo del tipo edilicias, la industria de la construcción suele sufrir una problemática recurrente: retrasos en la construcción de los proyectos y, por lo tanto, demora en entrega de las infraestructuras y de las viviendas.

En el análisis de la literatura se han recopilado 1181 causas de retrasos de proyectos de construcción enumeradas por 47 autores diferentes que realizan análisis cuantitativos con respecto a las posibles causas de retraso en los proyectos de construcción. Estos estudios se basan mayoritariamente en entrevistas, paneles de expertos y encuestas sobre las posibles problemáticas que afectan a los proyectos de construcción en su desarrollo normal. Estas causas han conformado una base de datos que ha sido analizada estadísticamente. La base de datos de la literatura muestra una fuerte tendencia al estudio de la problemática de las causas de retraso en los proyectos de construcción en continentes como Asia y África remarcando la necesidad de ampliar los horizontes de estudio en Europa y USA.

Asimismo, ha sido demostrada mediante un análisis estadístico la variabilidad que se observa en los datos relativos a la importancia que los autores dan a las causas de retrasos. Esta variabilidad dificulta establecer cuáles pueden ser las causas principales de retrasos de obras en un contexto globalizado. Teniendo en cuenta esta variabilidad en esta Tesis ha sido utilizado un método de conteo de aparición de causas para determinar las principales causas de retraso de los proyectos de construcción.

Con la utilización de este método de conteo se concluye que las principales causas de retraso en los proyectos de construcción son los problemas que se producen durante la ejecución, los problemas administrativos y los conflictos laborales, que en conjunto representan casi el 80% de las causas mencionadas en la literatura. Además, se puede deducir que los problemas durante la ejecución se basan en eventos impredecibles, mientras que los problemas administrativos tienen su origen en una mala gestión del flujo de caja.

A su vez, se han identificado siete subgrupos de causas de retraso del Nivel 2 como importantes debido al número de menciones destacando: “Cambios durante la construcción”, “Mala dirección de obra”, “Errores constructivos”, “Problemas económicos/financieros”, “Conflicto / Relaciones” y “Falta de experiencia”.

La clasificación, cuantificación y resumen de las principales causas de retraso que se enumeran en la literatura sobre demoras de proyectos de construcción ha sido posteriormente utilizada para abordar las propuestas de mejora en las principales causas detectadas, con el objetivo de que los proyectos de construcción se cumplan en los plazos previstos.

Como propuestas de mejora se han planteado: (1) Determinación de una taxonomía de comportamiento de los cronogramas. Dicha taxonomía servirá de referencia a los gestores de proyecto pudiendo así predecir de un modo genérico el comportamiento futuro de sus proyectos de construcción. (2) Determinación de una taxonomía de comportamiento de flujos de caja que puede ser utilizada con el mismo fin y (3) Modelación estadística para la predicción del comportamiento de los cronogramas de obra futuros en función de su comportamiento pasado.

En el Capítulo 6 se ha descrito el proceso para la determinación de una taxonomía de comportamiento de los cronogramas de obra de los proyectos de construcción. Han sido determinados 4 comportamientos típicos de los cronogramas de obra que servirán a los gestores de proyecto para comparaciones durante la etapa de ejecución, y más aún, a los diseñadores para prever en sus diseños las futuras tendencias de comportamiento.

En el Capítulo 7 se ha descrito el proceso para la determinación de la taxonomía de comportamiento de los flujos de caja de los proyectos de construcción. Han sido determinados también 4 comportamientos típicos de los flujos de caja. Además, se ha establecido una correlación entre los comportamientos de los cronogramas de obra y de los flujos de caja.

En el Capítulo 8 se ha descrito la metodología estadística basada en el uso de Cadenas de Markov que permite determinar el avance futuro de los cronogramas de obra en función de sus avances pasados. Esta herramienta, que proporciona un error de predicción considerablemente pequeño, permite a los gestores de proyecto proyectar sus futuros avances y tener referencia de los desvíos probables. Contar con esta información en etapas tempranas de obra permite tomar decisiones que encaucen el curso del proyecto nuevamente al cronograma planeado y pudiendo así reducir los retrasos de obra.

De acuerdo a los datos utilizados, este modelo matemático, que se ajusta a medida que se conoce más historia del proyecto, es capaz de predecir con un 2,38% de error medio el avance del cronograma del mes siguiente conociendo el mes anterior.

Tanto los estudios de las taxonomías de comportamiento de los cronogramas de obra y de los flujos de caja, como el modelo predictivo basado en la utilización de Cadenas de Markov conjugan un grupo de herramientas de gestión que podrán ser utilizadas por los gestores de proyecto para la mejora durante el proceso de obra. La utilización de herramientas predictivas es la base para determinar posibles tendencias de comportamiento de los proyectos en sus principales puntos débiles: la ejecución y los problemas financieros.

Las tres herramientas han sido propuestas con el objetivo de proporcionar a los gerentes de obra información basada en datos de obras reales sobre cómo avanzan los proyectos de obra. Los modelos estadísticos obtenidos pueden ser utilizados como una ayuda en la toma de decisiones de cara a conseguir ajustarse a los tiempos previstos originalmente, reduciendo los retrasos en los proyectos de construcción.

La reducción de los retrasos de los proyectos de construcción, enfocada en el pronóstico de comportamiento y guiados por el estudio de causas principales, proporciona una mejora sustancial al proceso de construcción de infraestructuras edilicias, cuya importancia ha sido demostrada con anterioridad.

Desde un punto de vista académico, estos resultados permiten vislumbrar la posibilidad de utilizar datos históricos registrados de la evolución de proyectos de construcción para la predicción y mejora del cumplimiento de tiempos de los nuevos. Conforme se disponga de más datos de calidad de cronogramas de obra, estos métodos abren la puerta al análisis y estudio de técnicas más avanzadas de predicción que pueda permita a los gestores disponer de predicciones sobre la tendencia del comportamiento de su proyecto, on-line y de manera automática.

## 9.2 LIMITACIONES Y FUTURAS LINEAS DE INVESTIGACIÓN

Como sucede con la mayoría de las investigaciones, esta tesis está sujeta a algunas limitaciones. Dadas las limitaciones de tiempo de una tesis de doctorado típica y la complejidad del problema, ha sido imposible abarcar todas las tipologías constructivas existentes para globalizar los resultados. En particular este proyecto de investigación se centró en bases de datos de proyectos de infraestructura edilicios de mediano a gran porte, sin tener la posibilidad de expandir el estudio a otras tipologías constructivas. La inclusión de datos acerca del comportamiento de otro tipo de construcciones podrá alimentar las bases de datos existentes y proporcionar mayor generalidad a los resultados obtenidos.

Para la realización de los modelos fueron utilizadas varias bases de datos diferentes, una compuesta por proyectos de construcción de viviendas, tradicionales, de mediano porte para la determinación de las taxonomías de comportamiento de los cronogramas de obra. Para este estudio también se utilizaron bases de datos de validación de programas de similar estilo en España. Esta misma base de datos fue utilizada para la determinación de la herramienta



de predicción basada en Cadenas de Markov. Por otro lado, para la determinación de los comportamientos típicos de los flujos de caja se utilizó una base de datos de proyectos de construcción promovidos, diferente a la anterior, con la que fue posible determinar las liberaciones monetarias de los proyectos de construcción. A pesar de ello, la mayor parte de los datos utilizados provienen del comportamiento de proyectos de construcción uruguayos, por lo que, además de generalizar las bases en lo que refiere a tipologías constructivas, se podría generalizar a través del añadido de datos de diferentes proyectos de construcción en otras localizaciones.

En segundo lugar, y entendiendo nuevamente las limitaciones temporales, los modelos de mejora propuestos únicamente se basan en modelos predictivos del comportamiento de los cronogramas de obra y de los flujos de caja, proponiendo soluciones a dos de las tres problemáticas principales detectadas. No obstante, el estudio del comportamiento humano, la productividad, el bajo rendimiento y la mejora de estos aspectos también podrían contribuir de modo significativo a la reducción de los tiempos de obra de los proyectos de construcción. Mayores estudios relacionados con el comportamiento humano, entrevistas a los involucrados y búsqueda de soluciones y consensos serían futuras líneas de investigación que se desprenden de este proyecto de tesis.

Finalmente, no solo es importante conseguir nuevos datos y ampliar las bases de datos aquí utilizadas, sino que una posible extensión de este trabajo podría ser la aplicación de técnicas de machine learning para la automatización de estos procesos. De este modo se podrán generar modelos de alimentación automática que tomen nuevas bases de datos y expongan las tendencias de comportamiento actualizadas.



## 10. REFERENCIAS

---

- AACE, 2007. *Recommended Practice - Forensic Schedule Analysis*. N° 29R-03 ed. s.l.:Asociation for the Advancement of Cost Engineering [AACE] International..
- Abba, W. & Niel, F., 2010. Integrating technical performance measurement. *The measurable News*, Volumen 4, pp. 6-8.
- Abdullah, M., Rahman, I. & Azis, A., 2010. Causes of Delay in MARA Management Procurement Construction Projects. *Journal of Surveying, Construction and Property*, 1(1), pp. 123-138.
- Acharya, N., Dai Lee, Y. & Man Im, H., 2006. Investigating delay factors in construction industry: A Korean perspective. *Korean Journal of Construction Engineering and Management*, 7(5), pp. 177-190.
- Afshari, S., Khosravi, S., Ghorbanali, A. & Borzaba, M., 2011. Identification of Causes of Non-excusable Delays of Construction Projects. *International Conference on E-buisness, Management and Economics*, 3(1), pp. 42-46.
- Ahmed, M., Azhar, S., Castillo, M. & Kappagantul, P., 2003. *Construction Delays in Florida: An Empirical Study*. Florida: Department of Community Affairs.
- Aibinu, A. & Jagboro, G., 2002. The effects of construction delays on Project delivery in Nigerian construction industry. *International Journal of Project management*, Volumen 20, pp. 593-599.
- Akogbe, R., Feng, X. & Zhou, J., 2013. Importance and Ranking Evaluation of Delay Factors for Development Construction Projects in Benin. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 17(6), pp. 1213-1222.
- Al Hammadi, S. & Nawab, M., 2016. Study of Delay Factors in Construction Projects. *International Advanced Research Journal in Science Engineering and Technology*, 3(4), pp. 87-93.
- Alaghbari, W., Razali, M., Azizah, K. & Ernawati, S., 2007. The significant factors causing delay of building construction projects in Malaysia. *Engineering Construction and Architectural Management*, 14(2), pp. 192-206.
- Al-Hadi Tumi, S., Omran, A. & Kadir Pakir, A., 2009. Causes of delay in construction industry in Libya. *ICEA - FAA, The International Conference on Economics and Administration, Romania*, pp. 265-271.

- Al-Hazim, N., Abu Salem, Z. & Ahmad, H., 2017. Delay and Cost Overrun in Infrastructure Projects in Jordan. *Procedia Engineering*, 182(1), pp. 18-24.
- Aliverdi, R., Moslemi, L. & Amir, S., 2013. Monitoring project duration and cost in a construction project. *International Journal of Project Management*, Volumen 31, pp. 411-423.
- Al-Kharashi, A. & Skitmore, M., 2009. Causes of delays in Saudi Arabian public sector. *Construction Management and Economics*, 27(1), pp. 3-23.
- Al-Momani, A., 2000. Construction delay: a quantitative analysis. *International Journal of Project Management*, 18(1), pp. 51-59.
- Alwi, S. & Hampson, K., 2003. *Identifying the important causes of delays in building construction projects*. Indonesia.: 9th East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction,.
- Anbari, F., 2003. Earned value project management method and extensions. *International Journal of Project Management*, 34(4), pp. 12-23.
- Anees, A. & Sabarinathan, S., 2016. Ranking of delay factors in the Indian building construction. *International Journal on Engineering Technology and Science*, 3(6), pp. 39-50.
- Anumba, J., Egbu, C. & Carrillo, P., 2005. *Knowledge Management in Construction*. United Kingdom: Blackwell Publishing Ltd.
- Araszkievicz, A., 2017. Application of Critical Chain Management in Construction Projects Schedules in a Multi-Project Environment: a Case Study. *Procedia Engineering*, Volumen 182, pp. 33-41.
- Aristondo, G., 2003. Cooperativismo, ayuda y autogestión. *Revista electrónica geográfica y ciencias sociales*, 146(2), pp. 41-98.
- Aschauer, D., 1990. *Why Is Infrastructure Important?* - *Proceedings of Conference*. Boston: Federal Reserve Bank of Boston.
- Ashley, D. & Teicholz, P., 1977. Pre-estimate cash flow analysis.. *Journal of the Construction Division - ASCE 13213 Proceeding*.
- Assaf, S. & Al-Hejji, S., 2006. Causes of delay in large construction projects. *International Journal of Project Management*, 24(1), pp. 349-357.
- Assaf, S. & Al-Hejji, S., 2006. Causes of delay in large construction projects. *International Journal of Project Management*, Volumen 24, pp. 349-357.

- Awari, S., Jamgade, M. & Patil, U., 2016. Identifying the Cause of delay in Construction Industry in Mumbai Region. *International Journal of Modern Trends in Engineering*, 2(7), pp. 539-543.
- Bagaya , O. & Song, J., 2016. Empirical study of factors influencing shedule delays in public construction projects in Burikna Faso. *Journal of management in Engineering*, Volumen 32, pp. 1-10.
- Bangash, Z., 2016. Analysing the Causes of Delays in Construction Projects for Peshawar: Constructor Perception. *Journal of Emerging Trends in Applied Engineering*, 1(1), pp. 13-18.
- Bertsekas, D. & Tsitsiklis, J., 2000. *Introduction to Probability*. USA: Athena Scientific.
- BID, 2000. Un nuevo impulso para la. *Banco Interamericano de Desarrollo integración de la infraestructura regional en América del Sur*.
- BID, 2000. *Un nuevo impulso para la integración de la infraestructura regional en América del Sur*. s.l.:Departamento de integración y programas regionales - Banco interamericano de desarrollo.
- Blanco, V., 2003. Earned value ,agement: a predictive analysis tool. *Navy Supply corps newsletter*, 66(2), pp. 24-27.
- Brlacic, S., Dimitric, M. & Delaso, M., 2016. Effective Project Management Tools dor modern. *Pomorski zbornik*, Volumen 51, pp. 131-145.
- Bruke, R., 2003. *Project Management Planning and Control Techniques*. 4th edition ed. s.l.:s.n.
- Burgos , M. & Ávila, D., 2015. *Análisis de las causas de incumplimiento de la programación en obras civiles*. Bogotá: Universidad Militar de Nueva Granada.
- C. España, 1978. *Norma Suprema del ordenamiento jurídico Español*. Congreso de los Diputados - España: Boletín Oficial del Estado.
- C. Uruguay, 1967. *Carta magna referida a derechos y obligaciones de los ciudadanos de la República Oriental del Uruguay*. Montevideo: Fundadores de Montevideo.
- Callahan, M., Quackenbush, D. & Rowings, J., 1992. *Construction Project Scheduling*. New York: McGraw-Hill.
- Canning, D. & Pedroni, F., 1999. *The Contribution of Infrastructure to Aggregate Output*. United Kingdom: Department of Economics, The Queen's University at Belfast.

- Carcaño, S., Delgadillo, M. & Fajardo, G., 2009. estudio de caso: demoras en la construcción de un proyecto en México. *Ingeniería*, 13(1), pp. 41-48.
- Carrillo, P., Anumba, C. & Kamara, J., 2000. *Knowledge Management Strategy for Construction: Key I.T. and contextual issues*. Reykjavik, Iceland: s.n.
- Carrillo, P., Robinson, H., Al-Ghassani, A. & Anumba, C., 2004. Knowledge Management in UK Construction: Strategies, Resources and Barriers. *Project Management Journal*, 35(1), pp. 46-56.
- CEPAL, 2004. Desarrollo de infraestructura y crecimiento económico: revisión conceptual. NU. CEPAL. *División de Recursos Naturales e Infraestructura*.
- Challal, A. & Tkiouat, M., 2012. Identification of the Causes of deadline slippage in construction projects: state of the art and application. *Journal of Service Science and Management*, 5(4), pp. 151-159.
- Chan, w. & Kumaraswamy, M., 1997. A comparative study of causes of time overruns. *International Journal of Project Management*, 1(15), pp. 55-63.
- Chileshe, N. & Danso, P., 2010. Causes of project cost overruns within the Ghanain road construction sector. *5th Built Environment Conference, South Africa*, pp. 67-81.
- Cioffi, D., 2006. Designing project management: A scientific notation and an improved formalism for Earned value calculations. *International Journal of project management*, Volumen 24, pp. 136-144.
- Clapham, D., 2010. Happiness, well-being and housing policy. *Policy & Politics*, 38(2), pp. 253-267.
- Cleaver, H., 1971. *Flexible financial control in the construction industry*. 2nd, Highett ed. Australia: Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation, Division of Building Research: Performance of Building Contracts.
- Correa, J. & Iral, L., 2006. A Study of the Power of Tests for Homogeneity of Variance. *Revista Colombiana de Estadística*, 29(1), pp. 57-76.
- Costa, J., Richard, W. & Randolph, M., 1987. Public Capital, Regional Output and Development. *Journal of Regional Science*, 23(7).
- Creswell, J., 2003. *Research Design: Qualitative, Quantitative, and Mixed Methods Approaches*. Second Edition ed. USA: Sage Publications, Inc..
- Cuenya, L. & Ruetti, E., 2010. Controversias epistemológicas y metodológicas entre el paradigma cualitativo y cuantitativo en psicología. *Revista Colombiana de Psicología*, 19(2), pp. 271-277.

- D'emurger, S., 2000. *Infrastructure Development and Economic Growth: An Explanation for Regional Disparities in China?*. Francia: CERDI-IDREC, CNRS—Universite d' Auvergne.
- De Marco, A. & Narbaev, T., 2013. Earned value-based. *Journal of Facilities Management*, 11(1), pp. 69-80.
- Denno, D., Kevin, T. & Eberts, R., 1989. Public Infrastructure and Regional Economic Development. *Working Paper 8909*.
- Diener, E., Sandvik, E., Seidlitz, L. & Diene, E., 1993. The relationship between income and subjective well-being: Relative or absolute?. *Social Indicators Research*, 28(3), pp. 195-223.
- Dillon, W. & Goldstein, M., 1984. *Multivariate analysis: Methods and applications*. s.l.:s.n.
- Dixon, R. & Martínez, L., 2014. *Los Paradigmas de Investigación en las Ciencias Sociales y de la Educación*. Cabudare, Venezuela.: Ensayo de Universidad Fermín Toro.
- Duncan, W., 2000. A guide to the project management body of knowledge. *Project Management Institute*, pp. 3-10.
- E.C., 2007. Strengthening project internal, how to enhance the role of s.l. *Office for official publications of the European Communities*.
- Eberts, R., 1988. *Public infrastructure and regional economic development: a simultaneous equations approach*. United Kindoms: s.n.
- Egbu, C. y otros, 2004. *Getting Started in Knowledge management: Concise Guidance for Construction Consultants and Contractors*. United Kindom: Department of Trade and Industry.
- El Razek, M., Bassioni, H. & Mobarak, M., 2008. Causes of delay in building Construction Projects in Egypt. *Journal of construction Engineering and Managment*, 134(11), pp. 831-841.
- Elnagar, H. & Yates, J., 1997. Construction documentation used as indicators of delays. *Cost Eginceering*, 39(8), pp. 31-37.
- Errasti, A. & Jaca, C., 2014. *Principios, métodos y técnicas para la investigación en dirección y Organización de empresas*. San Sebastián, España: Tecnun, Universidad de Navarra.
- Esfahani, H. & Ramirez, M., 2002. *Institutions, infrastructure, and economic growth*. USA: Department of Economics, University of Illinois at Urbana-Champaign.

- Etchezarreta, A., Cano, G., Hoekstra, J. & Dol, K., 2012. De la burbuja inmobiliaria a las ejecuciones hipotecarias. *Revista Ciudad y Territorio, Estudios territoriales*, Vol. XLIV(nº 174), pp. pp. 597-613.
- Ferrada, X. & Serpell, A., 2009. La gestión del conocimiento y la industria de la construcción. *Revista de la Construcción*, 8(1), pp. 46-58.
- Fleming, Q. & Koppelman, J., 2010. *Earned value project management*. Pewton Aquare, Pensilvania: Project Management Institute.
- Flores, M., 2009. Implicaciones de los paradigmas de investigación en la práctica educativa. *Revista Digital Universitaria*, 5(1), pp. 2-9.
- Frimpong, Y. & Oluwoye, J., 2003. Causes of delay and cost overruns in construction of groundwater projects in developing countries: Ghana as a case of study. *International Journal of Project Management*, Volumen 21, pp. 321-326.
- Fugar, F. & Adwoa, B., 2010. Delays in Building Construction Projects in Ghana. *Australasian Journal of Construction Economics and Building*, 10(2), pp. 103-116.
- García, A., 2005. *Métodos avanzados de estadística aplicada: métodos robustos y de remuestreo*. s.l.:UNED.
- Gergen, K., 2007. La ciencia psicológica en el contexto posmoderno. *Bogotá: Universidad*, pp. 93-115.
- Gluszak, M. & Lesniak, A., 2015. Construction delays in clients opinion - multivariate statistical analysis. *Procedia Engineering Creative Construction Conference*, 123(1), pp. 182-189.
- Gramlich, E., 1994. Infrastructure investment: a review essay. *Journal of Economic Literature*, 32(3), p. 1176- 1196.
- Gündüz, M., Nielsen, Y. & Ozdemir, M., 2013. Quantification of Delay Factors Using the Relative Importance Index Method for Construction Projects in Turkey. *Journal of Managment in Engineering*, 29(2), pp. 133-139.
- Guo, S., Chen, C. & Chui, C., 2016. Fuzzy duration forecast model for wind turbine construction project. *Automation in construction*.
- Hair, J., Anderson, R., Tatham, R. & Black, W., 2004. *Analisis multivariante* |. 5 ta Edición ed. s.l.:s.n.
- Halpin, D., 2006. *Construction management*.. s.l.:John Wiley.
- Hardy, J., 1970. Cash flow forecasting for the construction industry.. *MSc report. Dept. of Civil Engineering Loughborough University of Technology*..



- Hernandez, A. & Loayza, J., 2013. Planeamiento integral, control, construcción y análisis técnico ejecutado en un centro comercial en la ciudad de Arequipa. *Peru: Pontificia Universidad Católica de Perú*.
- Hernández, R., Fernández, C. & Baptista, P., 2010. *Metodología de la Investigación*. México D.F: McGraw-HILL.
- Hoekstra, J. & Vakilzad, C., 2011. High vacancy rate and rising house price: the Spanish paradox. *Tijdschrift voor Economische en Sociale Geografie*, 102(1), pp. pp. 55-71.
- Jacob, D., 2006. Forecasting project schedule completion with earned value. *The measurable news*, pp. 7-9.
- Jingsheg, J., Cheung, S. & Arditi, D., 2001. Construction Delay Computation Method. *Journal Construction Engineering and Management*, Volumen 27, pp. 60-65.
- Juran, J., 1950. Pareto, Lorenz, Cournot Bernoulli, Juran and Others. *Industrial Quality Control*, p. 25.
- Juran, J., 1951. *Quality Control Handbook*. First Edition ed. New York: McGraw-Hill Book Company.
- Juran, J., 1975. The non-Pareto principle; mea culpa. *Quality Progress*, 8(5), pp. 8-9.
- Kaliba, C., Muya, M. & Mumba, K., 2009. Cost escalation and schedule delays in road construction projects in Zambia. *International Journal of Project Management*, Volumen 27, pp. 522-531.
- Kamara, J., Anumba, C. & Carrillo, P., 2002. A clever approach to selecting a knowledge management strategy. *International Journal of Project Management*, Volumen 20, p. 205-211.
- Kamara, J., Anumba, C., Carrillo, P. & Augenbroe, G., 2002. Knowledge management in the architecture, engineering and construction industry. *Construction Innovation*, 2(1), pp. 53-67.
- Kazaz, a., Ulubeyli, s. & Tunchilekli, N., 2012. Causes of delays in construction projects in Turkey, ". *Journal of Civil Engineering and Management*, 18(3), pp. 426-435.
- Kenley, R., 1985. *Financing Construction: Cash Flows and Cash Farming* Routledge: s.n.
- Kenley, R. & Wilson, O., 1989. A construction project net cash flow model. *Construction Management and Economics*, 7(1), pp. 3-18.

- Khosrowshahi, F. & Kaka, A., 2003. A decision support model for construction cash flow management. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, p. 527–539 .
- Kihauale, A., 2011. Analysis of Determinants of Rural Households Purchase of Micro Health Insurance Plans in Tanzania. Nairobi.. *Research Proposal approved and funded by the African Economic Research Consortium (AERC)*.
- Kikwasi, G., 2012. Causes and Effects of Delays and Disruptions in Construction Projects in Tanzania. *Australasian Journal of Construction Economics and Building*, 1(2), pp. 52-59.
- Kimata, N., Malekela, J. & Mohamed, S., 2017. Variations on Forecasted Construction Cash Flows of Building Projects: A Structural Equation Modelling (SEM) Approach. *International Journal of Construction Engineering and Management*, 6(5), pp. 197-208.
- Kim, E., Wells, W. & Duffey, M., 2003. A model for effective implementation of Earned Value Management methodology. *International Journal of project Management*, 21(5), pp. 375-382.
- Koushki, P., Al-Rashid, K. & Kartman, N., 2005. Delays and cost increases in the construction of private residential projects in Kuwait. *Construction Management and Economics*, Volumen 23, pp. 285-294.
- Koushki, P., Al-Rashid, K. & Kartman, N., 2005. Delays and cost increases in the construction of private residential projects in Kuwait. *Construction Management and Economics*, Volumen 23, pp. 285-294.
- Kuhn, T., 1962. *The structure of scientific revolutions*. Chicago: Chicago University.
- Le-Hoai, I., Dai-Lee, Y. & Yong-Lee, J., 2008. Delay and Cost Overrun in Vietnam Large Construction Projects: A comparison with Other Selected Countries. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 12(6), pp. 367-377.
- Levene, H., 1960. *In Contributions to Probability and Statistics: Essays in Honor of Harold Hotelling*. Stanford University Press.; I. Olkin et al. eds..
- Levy, S., Sánchez, R. & Sánchez, M., 2002. *Administración de proyectos de construcción*. s.l.:McGraw-Hill.
- Likert, R., 1931. *A technique for the measurement of attitudes*. New York: Archives of Psychology - Columbia University Press.
- Lipke, W., 2002. A study of the normality of earned value indicators. *The measurable news*, pp. 1-16.

- Lipke, W., 2003. Achiving normality for cost. *The Measurable News*, Volumen Fall/Winter, pp. 6-11.
- Lledó, P. & Rivarola, G., 2007. *Gestión de proyectos*. s.l.:Pearson Educación.
- Logofet, D. & Lesnaya, E., 2000. The mathematics of Markov models: what Markov chains can really predict in forest successions.. *Ecological Modelling*, 126(2), pp. 285-298.
- Long, N., Ogunlana, S., Quang, T. & Chi-Lam, K., 2004. Large construction projects in developing countries: a case study from Vietnam. *International Journal of Project Managment*, 22(1), pp. 553-561.
- Lorenz, M., 1904. Methods of Measuring the Concentration of Wealth. *American Statistical Association Publication*, Volumen 9, pp. 200-219.
- Mackenzie, N. & Knipe, S., 2006. Research dilemmas: Paradigms, methods and methodology. *Issues in Educational Research*, 16(2), pp. 193-205.
- Malpass, P., 2005. Housing and the welfare state. The development of housing policy in Britain. *Palgrave Macmillan*.
- Mansfield, N., Ugwu, O. & Doran, T., 1994. Causes of delays and cost overruns in Nigerian construction projects. *International Journal of Project Managment*, Volumen 12, pp. 254-260.
- Marroquín Liu, D., 2010. *Aplicabilidad de los métodos de análisis de retrasos en los proyectos de construcción nacionales*. Perú: Universidad de Piura.
- Marzouk, M. & El-Rasas, T., 2014. Analyzing delay causes in Egyptian construction Projects. *Journal of Advanced Research*, 5(1), pp. 49-55.
- McCaffer, R., 1979. Cash flow forecasting.. *Quantity surveying*, pp. 22-26.
- McKim, R., Hagazy, T. & Attalla, M., 2000. Project performance control in recontruction projects. *Journal of Construction Engineering and Management*, 126(2), pp. 137-141.
- MICHSPEC, 1997. *Standard Contract Forms and Conditions of the Contract. Budget, State's Owner and Contractor Standard Construction Contract*. Michigan: Department of Management and Budget.
- Mohammed, K. & Danladi, A., 2012. Causes of delays in Nigeria Construction Industry. *Interdisciplinary Journal of Contemporary Research in Business*, 4(2), pp. 785-794.

- Moura, H., Teixeira, J. & Pies, B., 2007. *Dealing with cost and time in the Portuguese Construction Industry*. Portugal: in CIB World Building Congress.
- Mukuka, M., Aigbavboa, C. & Thwala, W., 2015. Effects of Construction Projects Schedule Overruns: A Case of the Gauteng Province, South Africa. *Procedia Manufacturing*, 3(1), pp. 1690-1695.
- Munnell, A., 1990. How does Public Infrastructure Affect Regional Economic Performance?. *Proceedings of Conference; Federal Reserve Bank of Boston*.
- Munnell, A., 1992. Infrastructure investment and economic growth. *Journal of Economic Perspectives*, 6(4).
- Nazem, S., 1968. Planning contractors capital.. *Building Technology and Management*, 6(10), pp. 256-260..
- Nitithamyong, P. & Skibniewski, M., 2004. Web-based construction project management systems: how to make them successful?. *Automation in Construction*, Volumen 13, pp. 491-506.
- Norman, E., Brotherton, S. & Fried, R., 2008. Work Breakdown structures: The New Jersey. *John Eiley & Sons*.
- Nyoni, T. & Bonga, W., 2017. Towards Factors Affecting Delays in Construction Projects: A Case of Zimbabwe. *Journal of Economics and Finance*, 2(1), pp. 12-28.
- Odeh, A. & Battaineh, H., 2002. Causes of construction delay: traditional contracts. *International Journal of Project Management*, Volumen 20, pp. 67-73.
- Odeyinka, H., Lowe, J. & Kaka, A., 2008. An evaluation of risk factors impacting construction cash flow forecast. *Journal of Financial Management of Property and Construction*, 13(1), pp. 5-17.
- Odeyinka, H. & Yusif, A., 1997. The causes and effects of construction delays on completion cost of housing projects in Nigeria. *Journal of Financial Management of Property and Construction*, 3(2), pp. 31-44.
- Ogunlana, S. & Promkuntong, K., 1996. Construction delays in a fast-growing economy: comparing Thailand with other economies. *Open Journal of Accounting*, 14(1), pp. 37-45.
- Ogunlana, S. & Promkuntong, K., 1996. Construction delays in a fast-growing economy: comparing Thailand with other economies. *International Journal of Project Management*, Volumen 14, pp. 37-45.
- ONU, 1948. *Declaración Universal de Derechos Humanos*. París, Asamblea General de las Naciones Unidas.

- ONU, 1996. *Pacto Internacional de Derechos Económicos, Sociales y Culturales*. Ginebra, Asamblea General de las Naciones Unidas .
- ONU, 2010. *El derecho a una vivienda adecuada*, Génova: Oficina del alto comisionado para las Naciones Unidas.
- Pathirage, C., Amaratunga, D. & Haigh, R., 2006. *Developing a business case to manage tacit knowledge within construction organizations*. Roma: s.n.
- Patton, M., 1999. *Qualitative evaluation and research methods*. Newbury Park: Sage.
- Pedraz, A., 2007. La revisión bibliográfica. *Nure Investigación*, pp. 4-7.
- Peña, 2., 2002. Análisis de datos multivariantes.
- Peterman, G., 1979. A way to forecast cash flow.. *World Construction*, pp. 9-22.
- Peters, T., 2003. *Importance in construction industry*. s.l.:Courrent Delay.
- Pfeffer , J. & Sutton, R., 2006. Evidence-based management. *Harvard Business Review*, 84(1).
- Philips, E. & Pugh, D., 2000. *How to get a PhD: a handbook for students and their supervisors*. London, UK: Open University Press.
- Pírez, C., 2008. Estadística-Análisis-Propuesta. Cooperativas de viviendas financiadas por el MVOTMA (1993-2007).. *Banco Hipotecario del Uruguay*, 2008. , pp. pp. 25-34.
- PMBOK, 2004. *Project Management Body of Knowledge*. 3rd Edition ed. s.l.:Project Management Institute.
- Punwani, A., 1997. A study of the growth-investment-financing nexus of the major UK construction groups.. *Construction management & economics*, 15(4), pp. 349-361.
- Reza , M. & Bagherpour, M., 2013. Project Cash Flow Forecasting Using Value at Risk. *Technical Journal of Engineering and Applied Sciences*, 3(20), pp. 2681-2685.
- Ricoy, C., 2006. Contribución sobre los paradigmas de investigación. *Revista do Centro de Educação*, 31(1), pp. 11-22.
- Rincón, L., 2012. *Introducción a los procesos estocásticos*. México: Facultad de Ciencias UNAM.
- Roman, M., 1999. *Guía práctica para el diseño de proyectos sociales*. Santiago de Chile: CIDE (Chile) .

- Rosenheck, R. y otros, 1998. Service system integration, access to services, and housing outcomes in a program for homeless persons. *American Journal of Public Health*, 88(11), pp. 1610-1615.
- Ross , S., 2003. *Introduction to Probability Model*. s.l.:s.n.
- Rozas, P. & Sánchez, R., 2004. *Desarrollo de infraestructura y crecimiento económico: revisión y crecimiento económico: revisión*. Santiago de Chile: División de Recursos Naturales e Infraestructura - Naciones Unidas.
- Rudea, I., 1999. *Investigación y Evaluación Cualitativa: Bases teóricas y conceptuales*. Barcelona: En Atención Primaria, Universidad Autónoma de Barcelona..
- Rudeli, N., Viles, E. & Santilli, A., 2018. A Construction Management Tool: Determining a Project Schedule Typical Behaviors Using Cluster Analysis. *International Journal of Civil and Environmental Engineering*, 12(5), pp. 485-492.
- Sabaté, C., 2012. De la Perservacion del Patrimonio a la Ordenación del Paisaje. *Intervenciones en Paisajes Culturales en Latinoamerica*, Volumen 502-11-0004-2, pp. 11-23.
- Sales, M., 2003. *Diagrama de Pareto*. s.l.:EALDE Business School.
- Sambasivan , M. & Wen-Soon, Y., 2007. Causes and Effects of delays in Malaysian. *International Journal of Project Managment*, 25(1), pp. 517-526.
- Schneide, J., 1997. *The holdout method*. s.l.:The school of computer science.
- Scott, A. & Knott, M., 1974. A cluster analysis method for grouping means in the analysis of variance. *Biometrics*, pp. 507-512.
- Senoucia, A., Ismaib, A. & Eldina, N., 2016. Time Delay and Cost Overrun in Qatar Public Construction Projects. *Procedia Engineering*, Volumen 164, pp. 368-375.
- Sepasgozar, S., Razkenari, M. & Barati, K., 2015. The importance of New Technology for Delay Mitigation in Construction Projects. *American Journal of Civil Engineering and Architecture*,, 3(1), pp. 15-20.
- Shaar, A., Bambanr, T., Babsail, M. & Abd El Fa, A., 2016. Design-construction interface problems in large building construction projects. *International Journal of ConstructionManagement*,, 17(3), pp. 1-13.
- Shirowzhan, M., Shanaki, M., Sebt, M. & Naghash , H., 2016. Evaluating delay factors in the construction and operation of port operational areas (case study: Shahid Rajaeep port complex. *Journal of Fundamental and applied sciences*, 8(2), pp. 732-763.

- Stumpf, G., 2000. Schedule Delay Analysis. *Cost Engineering*, 42(7), pp. 32-43.
- Sullivan, A. & Harris, F., 1985. Delays on large construction Projects. *International Journal of Operations & Production Management*, Volumen 6, pp. 25-33.
- Sweis, G., 2013. Factors Affecting Time Overruns in Public Construction Projects: The case of Jordan. *International Journal of Business and Management*, 8(23), pp. 120-129.
- Sweis, G., Sweis, A., Hammad, A. & Shboul, A., 2008. Delays in construction Projects: The case of Jordan. *International Journal of Project Management*, 26(1), pp. 665-674.
- Tague, N., 2005. *The Quality Toolbox*. 2 th edition ed. s.l.:ISBN: 978-0-87389-639-9.
- Tatom, J., 1993. The spurious effect of public capital formation on private sector productivity. *Policy Studies Journal*.
- Vandervoerde, S. & Vanhoucke, M., 2006. A comparison of different project duration forecasting methods. *International Journal of project Management*, Volumen 24, pp. 289-302.
- Vanhoucke M., 2014. Integrated project management control: first comes the theory, then the practice. *Management for professionals*.
- Vanhoucke, M., 2010. Measuring time - improving project performance *International series in operations, Research and Management Science*, Volumen 136.
- Viles, E., Rudeli, N. & Santilli, A., 2019. Causes of delay in construction projects: A quantitative analysis. *Engineering, Construction and Architectural Management*.
- Yuan, Z., 1999. Prediction of protein subcellular locations using Markov chain models. *FEBS letters*, 451(1), pp. 23-26.
- Zaneldin, E., 2006. Construction claims in United Arab Emirates: Types, causes, and frequency. *International Journal of Project Management*, Volumen 24, pp. 453-459.





# APÉNDICE A – CAUSAS DE RETRASO EN LOS PROYECTOS DE CONSTRUCCIÓN

FAMILIA NIVEL 1/2		Ejecución								Aspectos Administrativos			
AUTOR	CONT	Cambios durante la construcción	Controles de calidad	Errores constructivos	Falta de comunicación	Mala dirección de obra	Sitio / Movilización / Transporte	Problemas del consultor / contratista	Seguridad/Accidentes	Sub-contratos	Contrato	Condiciones económicas / financieras	Burocracia / trámites / permisos
Abdullah et al. (2010)	Asia	1 4%			1 6%	2 8%	2 16%			1 6%	1 6%	2 14%	
Acharya et al. (2006)	Asia	4 18%	1 3%	1 2%		3 17%				2 6%		1 3%	1 6%
Afshari et al. (2010)	Asia	2 12%			2 9%	4 19%	1 5%			1 8%	2 9%		
Ahmed et al. (2003)	América	3 11%	1 2%	2 3%	1 2%	4 23%	3 7%		1 2%	1 2%	1 2%	3 7%	2 5%
Akogbe et al. (2013)	África	3 12%	1 4%	2 8%	1 4%	4 11%	3 7%			1 4%	3 10%	2 12%	1 2%
Al Hammadi and Nawab (2016)	Asia	2 -		1 -	1 -	1 -	1 -					2 -	
Alaghbari et al. (2007)	Asia	1 4%		2 6%	1 6%	2 6%	2 6%			1 3%	1 3%	3 8%	1 4%
Al-Hadi Tumi et al. (2009)	África	2 7%	1 2%	3 6%	1 4%	4 12%	2 7%			1 2%	2 5%	3 13%	2 5%
Al-Hazim et al. (2017)	Asia	2 2%				2 2%	1 4%					1 3%	1 2%

Apéndice A – Causas de retraso de los proyectos de construcción

FAMILIA NIVEL 1/2		Ejecución									Aspectos Administrativos		
AUTOR	CONT	Cambios durante la construcción	Controles de calidad	Errores constructivos	Falta de comunicación	Mala dirección de obra	Sitio / Movilización / Tecnología	Problemas del consultor / subcontratistas	Seguridad/Accidentes	Sub-contratos	Contrato	Condiciones económicas / financieras	Burocracia / trámites / permisos
Al-Kharashi and Skitmore (2009)	Asia	5	1	3	1	4	2	2	1	2	2	3	4
		6%	1%	4%	5%	7%	2%	2%	1%	2%	3%	7%	5%
Al-Momani (1999)	Asia	1		1								1	
		-		-								-	
Alwi and Hampson (2003)	Asia	1		1	1	4				1	1		
		4%		3%	4%	16%				3%	2%		
Anees and Sabarinathan (2016)	Asia	3		3	1	2	2	1	1	1		2	
		-		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Assaf and Al-Hejji (2006)	Asia		1	3	1	4	2		1	1	1	2	2
			-	-	-	-	-		-	-	-	-	-
Awari et al. (2016)	Asia		1	5	1	3	3		1	1	1	2	3
			-	-	-	-	-		-	-	-	-	-
Bangash (2016)	Asia	1	1	1	1	1	1		1	1			
		7%	6%	7%	7%	7%	7%		5%	7%			
Challal y Tkiouat (2012)	África		1		3								1
			7%		29%								10%
Chileshe and Danso (2010)	África		1		1	1						2	
			9%		7%	8%						19%	
El Razeq et al. (2008)	África		1	1		4	1			1	1	1	2
			2%	4%		12%	4%			7%	4%	12%	6%
Frimpong et al. (2003)	África			1	2	4					1	4	
				3%	6%	14%					5%	22%	
Fugar and Adwoa (2010)	África		2	1		3	2		1	1		3	2
			6%	3%		13%	7%		2%	3%		11%	6%
Gluszak and Lesniak (2015)	Europa			1		1						1	1
				10%		9%						9%	10%
Gündüz et al. (2013)	Asia/Europa	4	2	2	1	3	2	1	1	1	1	3	2
		6%	5%	3%	4%	4%	2%	1%	1%	1%	1%	5%	2%
Kaliba et al. (2009)	África		2		1		1				1	3	
			20%		7%		7%				7%	33%	

Apéndice A – Causas de retraso de los proyectos de construcción

FAMILIA NIVEL 1/2		Ejecución								Aspectos Administrativos			
AUTOR	CONT	Cambios durante la construcción	Controles de calidad	Errores constructivos	Falta de comunicación	Mala dirección de obra	Sitio / Movilización / Tecnología	Problemas del consultor / subcontratista	Seguridad/Accidentes	Sub-contratos	Contrato	Condiciones económicas / financieras	Burocracia / trámites / permisos
Kazaz et al. (2012)	Asia/Europa	1 4%	2 8%	1 5%	1 3%		1 6%		1 1%			3 15%	1 3%
Kikwasi (2012)	África		1 2%		1 6%	1 9%	1 5%	1 7%			1 5%	2 13%	1 5%
Koushki et al. (2005)	Asia	1 19%										1 18%	
Le-Hoai et al. (2008)	Asia	1 4%	1 4%	1 8%	1 4%	1 6%	1 8%		2 8%	1 4%	1 4%	3 24%	1 2%
Long et al. (2004)	Asia	2 12%		1 7%		1 6%						1 6%	2 13%
Mansfield et al. (1994)	África				1 4%	2 10%			1 2%	1 7%	4 27%	1 10%	
Marzouk and El-Rasas (2014)	África					1 10%				1 10%	1 10%	2 21%	
Mohammed and Danladi (2012)	África	3 9%	1 2%		1 4%	4 15%	2 5%	1 2%	1 2%	1 2%	2 5%	3 13%	2 5%
Moura et al. (2007)	Europa							1 9%			1 5%	1 6%	
Mukuka et al. (2015)	África	2 6%	1	2 10%	2 3%	3 5%	2 3%		1 1%	1 3%		3 4%	3 4%
Nyoni and Bonga (2017)	África	1 3%	1 3%	1 2%	1 2%	2 4%	2 4%			1 3%	3 6%	3 10%	1 0%
Odeh and Battaineh (2001)	Asia	1 3%	1 3%	1 4%	1 3%	3 12%	1 3%		1 4%	1 4%	1 4%	1 5%	1 2%
Odeyinka and Yusif (1997)	África			1 5%	1 6%	3 19%		1 6%		1 8%	1 5%	1 9%	
Ogunlana and Promkuntong (1996)	Asia		1 8%	1 4%		2 18%				1 4%		2 4%	1 1%
Sambasivan and Wen-Soon (2006)	Asia	1		1	1	3	1		1	2	1	1	1
			4%	4%	4%	12%	3%		3%	7%	3%	4%	3%

Apéndice A – Causas de retraso de los proyectos de construcción

FAMILIA NIVEL 1/2		Ejecución									Aspectos Administrativos		
AUTOR	CONT	Cambios durante la construcción	Controles de calidad	Errores constructivos	Falta de comunicación	Mala dirección de obra	Sitio / Movilización / Tecnología	Problemas del consultor / operarios	Seguridad/Accidentes	Sub-contratos	Contrato	Condiciones económicas / financieras	Burocracia / trámites / permisos
Al-Kharashi and Skitmore (2009)	Asia	5	1	3	1	4	2	2	1	2	2	3	4
		6%	1%	4%	5%	7%	2%	2%	1%	2%	3%	7%	5%
Al-Momani (1999)	Asia	1		1								1	
		-		-								-	
Alwi and Hampson (2003)	Asia	1		1	1	4				1	1		
		4%		3%	4%	16%				3%	2%		
Anees and Sabarinathan (2016)	Asia	3		3	1	2	2	1	1	1		2	
		-		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Assaf and Al-Hejji (2006)	Asia		1	3	1	4	2		1	1	1	2	2
			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Awari et al. (2016)	Asia		1	5	1	3	3		1	1	1	2	3
			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Bangash (2016)	Asia	1	1	1	1	1	1		1	1			
		7%	6%	7%	7%	7%	7%		5%	7%			
Challal y Tkiouat (2012)	África		1		3								1
			7%		29%								10%
Chileshe and Danso (2010)	África		1		1	1						2	
			9%		7%	8%						19%	
El Razeq et al. (2008)	África		1	1		4	1			1	1	1	2
			2%	4%		12%	4%			7%	4%	12%	6%
Frimpong et al. (2003)	África			1	2	4					1	4	
				3%	6%	14%					5%	22%	
Fugar and Adwoa (2010)	África		2	1		3	2		1	1		3	2
			6%	3%		13%	7%		2%	3%		11%	6%
Gluszak and Lesniak (2015)	Europa			1		1						1	1
				10%		9%						9%	10%
Gündüz et al. (2013)	Asia/Europa	4	2	2	1	3	2	1	1	1	1	3	2
		6%	5%	3%	4%	4%	2%	1%	1%	1%	1%	5%	2%
Kaliba et al. (2009)	África		2		1		1				1	3	
			20%		7%		7%				7%	33%	

Apéndice A – Causas de retraso de los proyectos de construcción

FAMILIA NIVEL 1/2		Ejecución								Aspectos Administrativos			
AUTOR	CONT	Cambios durante la construcción	Controles de calidad	Errores constructivos	Falta de comunicación	Mala dirección de obra	Sitio / Movilización / Transporte	Problemas del consultor / operarios	Seguridad/Accidentes	Sub-contratos	Contrato	Condiciones económicas/ financieras	Burocracia / trámites / permisos
Sepasgozar et al. (2015)	Asia	1 21%						1 3%					
Sullivan and Harris (1985)	Europa	1 1%					1 4%			3 40%	2 5%		
Sweis (2013)	Asia	2 10%		2 6%		3 11%	1 3%		2 4%		1 3%	2 6%	1 2%
Sweis et al. (2008)	Asia	1 3%	1 2%	1 3%	1 3%	4 14%	2 3%	1 4%	2 5%			2 12%	3 3%
Zaneldin (2006)	Asia	3	2		1	2			1		2	2	1

FAMILIA NIVEL 1/2		Proyecto/Diseño						Mano de obra				
AUTOR	CONT	Demoras en el diseño	Diseño complejo	Errores de diseño	Mala estimación de costos	Mala estimación de plazos	Malos estudios previos	Aspectos socio-culturales	Baja productividad	Conflictos / relacionamiento	Falta de experiencia	Falta de personal
Abdullah et al. (2010)	Asia					2 9%	1 4%			1 3%	2 13%	1 7%
Acharya et al. (2006)	Asia			2 6%		2 7%	2 6%	1 2%	1 3%	2 5%	3 9%	
Afshari et al. (2010)	Asia	2 13%		1 4%						1 4%	1 5%	
Ahmed et al. (2003)	América	1 3%	1 2%	1 3%			2 4%		1 2%	3 5%	1 2%	

Apéndice A – Causas de retraso de los proyectos de construcción

FAMILIA NIVEL 1/2		Proyecto/Diseño					Mano de obra					
AUTOR	CONT	Demoras en el diseño	Diseño complejo	Errores de diseño	Mala estimación de costos	Mala estimación de plazos	Malos estudios previos	Aspectos socio-culturales	Baja productividad	Conflictos / relacionamiento	Falta de experiencia	Falta de personal
Akogbe et al. (2013)	África	1 3%		1 3%			1 2%			1 2%	1 3%	
Al Hammadi and Nawab (2016)	Asia	1 -				1 -				2 -		
Alaghbari et al. (2007)	Asia			1 3%			1 3%		2 7%		4 17%	1 3%
Al-Hadi Tumi et al. (2009)	África			2 4%	1 2%	1 3%	1 3%	1 4%	1 2%	1 3%	2 7%	
Al-Hazim et al. (2017)	Asia			1 7%	1 7%	1 5%	1 25%			1 1%	1 9%	
Al-Kharashi and Skitmore (2009)	Asia	1 2%	1 1%	1 1%		4 5%	2 2%	1 1%	3 5%	8 12%	3 9%	1 1%
Al-Momani (1999)	Asia			1 -	1 -	1 -						
Alwi and Hampson (2003)	Asia	1 4%		1 13%			1 3%		1 3%	1 3%	2 10%	
Anees and Sabarinathan (2016)	Asia	2 -	1 -	4 -		2 -	1 -		4 -	3 -	2 -	1 -
Assaf and Al-Hejji (2006)	Asia	2 -	1 -	4 -		3 -	2 -	2 -	3 -	4 -	3 -	1 -
Awari et al. (2016)	Asia	1 -		2 -		2 -	2 -		2 -	2 -	2 -	1 -
Bangash (2016)	Asia	2 13%		2 15%		1 -	1 -			1 6%	1 6%	
Challal y Tkouat (2012)	África				1 16%	1 11%	1 14%		1 12%			
Chileshe and Danso (2010)	África		1 4%	1 7%	1 7%	1 8%			1 7%	2 10%	1 8%	
El Razek et al. (2008)	África	1 3%		1 3%		1 3%	1 5%		1 3%	1 2%	2 5%	1 3%

Apéndice A – Causas de retraso de los proyectos de construcción

FAMILIA NIVEL 1/2		Proyecto/Diseño					Mano de obra					
AUTOR	CONT	Demoras en el diseño	Diseño complejo	Errores de diseño	Mala estimación de costos	Mala estimación de plazos	Malos estudios previos	Aspectos socio-culturales	Baja productividad	Conflictos / relacionamiento	Falta de experiencia	Falta de personal
Frimpong et al. (2003)	África				2		2				1	1
					8%		7%				4%	3%
Fugar and Adwoa (2010)	África	1	1	1	1	2			2	1	1	
		4%	3%	4%	3%	9%			5%	6%	2%	
Gluszak and Lesniak (2015)	Europa		1	1					1	1		
			11%		10%				10%	11%		
Gündüz et al. (2013)	Asia/Europa	3	1	3	4	3		5	7	3	1	
		4%	2%	3%	5%	5%		6%	7%	9%	1%	
Kaliba et al. (2009)	África								2			
									13%			
Kazaz et al. (2012)	Asia/Europa	1			1	2		1	2	2	1	
		3%			4%	5%		7%	8%	6%	3%	
Kikwasi (2012)	África		1	1		1		1	2	1		
			3%	6%		4%		6%	9%	6%		
Koushki et al. (2005)	Asia									2	1	
										23%	10%	
Le-Hoai et al. (2008)	Asia		1	1	1					1		
			5%	5%	5%					3%		
Long et al. (2004)	Asia	1	1	1	1	1		1		2		
		6%	6%	6%	7%	6%		6%		12%		
Mansfield et al. (1994)	África	1				1			1			
		5%				7%			4%			
Marzouk and El-Rasas (2014)	África	1				1		1		1		
		9%				10%		10%		9%		
Mohammed and Danladi (2012)	África	1	2	1	1	1	1		1	2		
		2%	4%	3%	3%	4%		4%	7%			
Moura et al. (2007)	Europa	1	1					1	2	1		
		14%	11%					5%	15%	5%		
Mukuka et al. (2015)	África	2	3	1	1	1	1	1	2	2	1	
		3%	5%	2%	1%	1%	3%	4%	9%	1%		

Apéndice A – Causas de retraso de los proyectos de construcción

FAMILIA NIVEL 1/2		Proyecto/Diseño						Mano de obra				
AUTOR	CONT	Demoras en el diseño	Diseño complejo	Errores de diseño	Mala estimación de costos	Mala estimación de plazos	Malos estudios previos	Aspectos socio-culturales	Baja productividad	Conflictos / relacionamiento	Falta de experiencia	Falta de personal
Nyoni and Bonga (2017)	África	2 5%	1 2%	3 5%		4 9%	1 2%		1 3%	4 8%	2 12%	1 2%
Odeh and Battaineh (2001)	Asia	1 3%				1 4%	1 3%		1 4%	4 17%	1 5%	1 4%
Odeyinka and Yusif (1997)	África	1 7%		1 6%						1 6%		
Ogunlana and Promkuntong (1996)	Asia			1 7%			2 7%		2 8%	1 2%	1 4%	1 7%
Sambasivan and Wen-Soon (2006)	Asia	1 3%				1 3%	1 4%		1 4%	3 17%	1 4%	1 4%
Sepasgozar et al. (2015)	Asia		1 20%						1 9%	1 10%		1 12%
Sullivan and Harris (1985)	Europa		1 6%				2 13%			1 3%	1 5%	1 4%
Sweis (2013)	Asia			1 4%			3 7%			2 5%	2 16%	1 3%
Sweis et al. (2008)	Asia	1 3%					1 5%			2 4%	1 8%	2 5%
Zaneldin (2006)	Asia			2 7%		2 9%	1 3%			4 12%		



Apéndice A – Causas de retraso de los proyectos de construcción

FAMILIA NIVEL 1/2		Maquinaria			Materiales					Clima		Otros	
AUTOR	CONT	Calidad de la maquinaria	Mal manejo de maquinaria	Obtención de la maquinaria	Calidad del material	Cambios de material	Entrega del material	Obtención del material	Precio del material	Uso inadecuado del material	Desastres naturales	Tiempo y clima	Otros
Abdullah et al. (2010)	Asia						1						
							5%						
Acharya et al. (2006)	Asia	1									1		
		2%									3%		
Afshari et al. (2010)	Asia			1			1						
				5%			6%						
Ahmed et al. (2003)	América			1			1	1			1	1	
				2%			2%	2%			6%	2%	
Akogbe et al. (2013)	África			1				1	1			1	
				3%				4%	3%			2%	
Al Hammadi and Nawab (2016)	Asia						1	1					
							-	-					
Alaghbari et al. (2007)	Asia			1			2	1				1	
				7%			6%	3%				4%	
Al-Hadi Tumi et al. (2009)	África						2	1				1	
							5%	3%				1%	
Al-Hazim et al. (2017)	Asia	1			1			1	1			1	
		3%			1%			7%	5%			17%	
Al-Kharashi and Skitmore (2009)	Asia	2	1	1	1	1	3	3	1				
		2%	1%	2%	1%	1%	4%	3%	1%				
Al-Momani (1999)	Asia											1	
												-	
Alwi and Hampson (2003)	Asia	1	1	1	1		1			2		1	
		3%	3%	3%	3%		7%			9%		3%	
Anees and Sabarinathan (2016)	Asia	2	1	1	1	1	2	2					
		-	-	-	-	-	-	-					
Assaf and Al-Hejji (2006)	Asia	2		1	1	1	1	3				1	
		-		-	-	-	-	-				-	
Awari et al. (2016)	Asia	2	1	1			1	2			1	1	
		-	-	-			-	-			-	-	

Apéndice A – Causas de retraso de los proyectos de construcción

FAMILIA NIVEL 1/2		Maquinaria			Materiales					Clima		Otros	
AUTOR	CONT	Calidad de la maquinaria	Mal manejo de maquinaria	Obtención de la maquinaria	Calidad del material	Cambios de material	Entrega del material	Obtención del material	Precio del material	Uso inadecuado del material	Desastres naturales	Tiempo y clima	Otros
Bangash (2016)	Asia						1						
							6%						
Challal y Tkiouat (2012)	África												
Chileshe and Danso (2010)	África											1	
												6%	
El Razek et al. (2008)	África	1	1		1	2	1					1	
		2%	3%		3%	7%	3%					2%	
Frimpong et al. (2003)	África	1				1	3	1				1	
		4%				4%	12%	4%				4%	
Fugar and Adwoa (2010)	África	1				1	1					1	
		3%				3%	3%					3%	
Gluszak and Lesniak (2015)	Europa		1									1	
			9%									11%	
Gündüz et al. (2013)	Asia/Europa	2	1	1	1	1	3	3			1	1	
		5%	2%	1%	1%	1%	4%	4%			1%	1%	
Kaliba et al. (2009)	África		1				1						
			7%				7%						
Kazaz et al. (2012)	Asia/Europa	1					2	1	2			1	
		3%					5%	3%	6%			2%	
Kikwasi (2012)	África		1				2					1	
			3%				8%					3%	
Koushki et al. (2005)	Asia						1					1	
							16%					14%	
Le-Hoi et al. (2008)	Asia						1					1	
							5%					2%	
Long et al. (2004)	Asia	1											
		6%											
Mansfield et al. (1994)	África						2					1	
							17%					7%	

Apéndice A – Causas de retraso de los proyectos de construcción

FAMILIA NIVEL 1/2		Maquinaria			Materiales					Clima		Otros	
AUTOR	CONT	Calidad de la maquinaria	Mal manejo de maquinaria	Obtención de la maquinaria	Calidad del material	Cambios de material	Entrega del material	Obtención del material	Precio del material	Uso inadecuado del material	Desastres naturales	Tiempo y clima	Otros
Marzouk and El-Rasas (2014)	África						1						
							9%						
Mohammed and Danladi (2012)	África					1	2					1	
						2%	6%					1%	
Moura et al. (2007)	Europa	1			1								2
		5%			6%								19%
Mukuka et al. (2015)	África	2	1	3	1	2	1	1	2	1	1		
		7%	2%	5%	2%	6%	3%	1%	3%	1%	1%		
Nyoni and Bonga (2017)	África		1			2	2			1		1	
			3%			5%	4%			1%		2%	
Odeh and Battaineh (2001)	Asia		1	1			1				1	1	
		4%		3%			4%					3%	
Odeyinka and Yusif (1997)	África									1	1	1	
										10%	4%	9%	
Ogunlana and Promkuntong (1996)	Asia	1	1	1	1		1	1					
		2%	4%	5%	1%		1%	8%		7%			
Sambasivan and Wen-Soon (2006)	Asia		1	1			1					1	
			4%	4%			4%					3%	
Sepasgozar et al. (2015)	Asia						1						1
							12%						12%
Sullivan and Harris (1985)	Europa	1					2					1	
		2%					12%					4%	
Sweis (2013)	Asia	1	1		1	1	1	1				1	
		2%	2%	2%		2%	2%	2%				8%	
Sweis et al. (2008)	Asia	2	1			1	1	1				1	
		4%	3%			2%	2%	2%				6%	
Zaneldin (2006)	Asia							1					
								4%					

Apéndice A – Causas de retraso de los proyectos de construcción

Familia Nivel 1								
AUTOR	CONT	Ejecución	Aspectos Administrativos	Proyecto/Diseño	Mano de obra	Maquinaria	Materiales	Clima Otros
Abdullah et al. (2010)	Asia	7	3	3	4		1	
		40%	20%	13%	22%		5%	
Acharya et al. (2006)	Asia	11	2	6	7	1		1
		46%	10%	19%	20%	2%		3%
Afshari et al. (2010)	Asia	10	2	3	2	1	1	
		53%	9%	17%	9%	5%	6%	
Ahmed et al. (2003)	América	16	6	5	5	1	2	2
		52%	15%	12%	8%	2%	4%	8%
Akogbe et al. (2013)	África	15	6	3	2	1	2	1
		51%	24%	8%	5%	3%	7%	2%
Al Hammadi and Nawab (2016)	Asia	6	2	2	2		2	
Alaghbari et al. (2007)	Asia	9	5	2	7	1	3	1
		31%	16%	6%	27%	7%	9%	4%
Al-Hadi Tumi et al. (2009)	África	14	7	5	5		3	1
		40%	23%	12%	16%		8%	1%
Al-Hazim et al. (2017)	Asia	5	2	4	2	1	3	1
		8%	4%	44%	10%	3%	13%	17%
Al-Kharashi and Skitmore (2009)	Asia	21	9	9	16	4	9	
		31%	14%	11%	28%	5%	11%	
Al-Momani (1999)	Asia	2	1	3				1
Alwi and Hampson (2003)	Asia	8	1	3	4	3	4	1
		30%	2%	20%	15%	9%	20%	3%
Anees and Sabarinathan (2016)	Asia	14	2	10	10	4	6	
Assaf and Al-Hejji (2006)	Asia	13	5	13	13	3	6	1
Awari et al. (2016)	Asia	15	6	7	7	4	3	2

Apéndice A – Causas de retraso de los proyectos de construcción

Familia Nivel 1									
AUTOR	CONT	Ejecución	Aspectos Administrativos	Proyecto/Diseño	Mano de obra	Maquinaria	Materiales	Clima	Otros
Bangash (2016)	Asia	8		6	2		1		
		54%		28%	12%		6%		
Challal y Tkiouat (2012)	África	4	1	3	1				
		37%	10%	41%	12%				
Chileshe and Danso (2010)	África	3	2	4	4			1	
		24%	19%	26%	25%			6%	
El Razek et al. (2008)	África	8	4	4	5	2	4	1	
		28%	22%	15%	14%	5%	13%	2%	
Frimpong et al. (2003)	África	7	5	4	2	1	5	1	
		23%	27%	15%	7%	4%	20%	4%	
Fugar and Adwoa (2010)	África	10	5	6	4	1	2	1	
		35%	17%	23%	13%	3%	7%	3%	
Gluszak and Lesniak (2015)	Europa	2	2	2	2	1		1	
		19%	19%	21%	21%	9%		11%	
Gündüz et al. (2013)	Asia/Europa	17	6	14	16	4	8	2	
		28%	8%	19%	24%	8%	10%	2%	
Kaliba et al. (2009)	África	4	4		2	1	1		
		34%	40%		13%	7%	7%		
Kazaz et al. (2012)	Asia/Europa	7	4	4	6	1	5	1	
		28%	18%	11%	23%	3%	14%	2%	
Kikwasi (2012)	África	5	4	3	4	1	2	1	
		29%	22%	13%	21%	3%	8%	3%	
Koushki et al. (2005)	Asia	1	1		3		1	1	
		19%	18%		34%		16%	14%	
Le-Hoi et al. (2008)	Asia	9	5	3	1		1	1	
		45%	30%	14%	3%		5%	2%	
Long et al. (2004)	Asia	4	3	5	3	1			
		25%	19%	31%	18%	6%			
Mansfield et al. (1994)	África	5	5	2	1		2	1	
		23%	37%	13%	4%		17%	7%	

Apéndice A – Causas de retraso de los proyectos de construcción

Familia Nivel 1									
AUTOR	CONT	Ejecución	Aspectos Administrativos	Proyecto/Diseño	Mano de obra	Maquinaria	Materiales	Clima	Otros
Marzouk and El-Rasas (2014)	África	2	3	2	2		1		
		21%	31%	20%	19%		9%		
Mohammed and Danladi (2012)	África	14	7	5	4		3	1	
		42%	24%	11%	14%		8%	1%	
Moura et al. (2007)	Europa	1	2	2	4	1	1		2
		9%	11%	25%	25%	5%	6%		19%
Mukuka et al. (2015)	África	14	6	7	7	3	10	2	
		31%	9%	11%	19%	8%	19%	3%	
Nyoni and Bonga (2017)	África	9	7	11	8	1	5	1	
		20%	17%	23%	25%	3%	10%	2%	
Odeh and Battaineh (2001)	Asia	10	3	3	7	1	2	2	
		37%	11%	10%	29%	4%	6%	3%	
Odeyinka and Yusuf (1997)	África	7	2	2	1		1	2	
		44%	13%	13%	6%		10%	13%	
Ogunlana and Promkuntong (1996)	Asia	5	3	3	5	3	4		
		33%	6%	13%	20%	11%	17%		
Sambasivan and Wen-Soon (2006)	Asia	10	3	3	6	1	2	1	
		37%	10%	10%	28%	4%	7%	3%	
Sepasgozar et al. (2015)	Asia	2		1	3		1		1
		24%		20%	32%		12%		12%
Sullivan and Harris (1985)	Europa	5	2	3	3	1	2	1	
		45%	5%	19%	12%	2%	12%	4%	
Sweis (2013)	Asia	10	4	4	5	2	4	1	
		33%	11%	12%	23%	4%	9%	8%	
Sweis et al. (2008)	Asia	13	5	2	5	3	3	1	
		39%	15%	8%	18%	7%	7%	6%	
Zaneldin (2006)	Asia	9	5	5	4		1		
		45%	19%	19%	12%		4%		

## APÉNDICE B – BASES DE DATOS CRONOGRAMAS

---

Proy	1/10t	2/10t	3/10t	4/10t	5/10t	6/10t	7/10t	8/10t	9/10t	10/10t	ES
0263	0,26	4,15	3,12	5,24	6,45	6,83	7,68	5,78	10,13	8,95	54
0292	16,83	4,25	4,80	6,08	6,70	9,43	7,82	9,96	10,49	8,69	58
0296	6,67	9,12	7,30	7,67	8,18	9,59	7,98	6,30	9,16	15,02	32
0327	1,07	11,13	5,34	8,86	7,61	5,88	9,75	11,22	13,13	10,03	21
0336	4,06	8,70	11,06	9,27	10,55	6,08	5,35	16,19	12,47	9,37	15
0338	11,91	8,81	10,44	11,42	6,32	7,70	8,35	7,32	2,62	5,27	44
0358	1,53	5,66	6,81	5,00	5,52	6,33	10,04	12,53	10,43	7,00	38
0360	0,00	1,39	4,92	3,05	7,98	7,86	6,48	6,51	4,18	3,24	111
0364	12,48	8,95	10,08	5,60	9,72	9,46	9,64	8,51	6,84	7,72	21
0366	10,86	5,02	10,12	16,34	15,34	14,43	7,83	7,19	6,12	6,75	0
0368	9,68	7,74	7,90	6,06	6,45	8,93	13,10	13,92	9,34	6,81	67
0369	2,01	12,41	10,98	7,12	8,08	15,09	20,13	10,55	10,15	3,48	29
0370	8,72	7,33	9,79	12,11	11,11	10,24	12,51	11,66	9,21	5,89	9
0374	2,52	7,03	7,56	9,77	9,92	7,84	10,38	6,25	1,82	7,07	71
0377	4,78	2,85	6,03	5,52	4,43	7,05	4,34	7,56	12,03	7,65	65
0381	12,08	7,78	11,57	11,29	7,24	14,45	6,28	12,45	8,21	4,74	21
0389	3,07	3,88	4,32	7,15	3,88	3,72	3,98	5,39	14,41	15,27	63
0392	1,86	7,04	3,08	5,43	5,79	6,78	9,32	7,22	10,44	13,82	67
0394	3,23	8,09	6,09	8,54	7,00	10,78	7,35	7,22	10,95	12,16	21
0396	5,82	4,87	7,28	6,51	8,08	8,02	7,20	10,65	10,41	5,38	38
0423	9,44	12,34	6,71	0,00	0,88	30,13	5,23	16,39	6,89	10,89	3
0424	2,44	9,10	13,36	10,79	9,74	16,05	11,35	15,39	8,12	1,76	3
0432	3,32	3,04	9,26	10,36	11,67	6,60	9,29	7,60	12,94	11,23	35
0434	3,79	3,18	5,25	4,76	9,36	7,41	5,89	7,45	5,49	6,02	120
0437	10,62	8,75	10,19	8,03	9,50	9,94	8,39	7,29	7,96	10,39	18
0440	10,64	10,60	10,97	8,45	14,79	8,90	6,45	9,48	10,77	8,37	4
0444	9,80	5,89	6,21	7,38	7,21	11,33	13,17	11,42	5,99	6,96	38

Apéndice B – Bases de datos de cronogramas

Proy.	1/10t	2/10t	3/10t	4/10t	5/10t	6/10t	7/10t	8/10t	9/10t	10/10t	ES
0466	10,94	8,71	9,65	8,82	9,19	10,07	9,38	6,16	8,14	10,59	23
0476	9,68	7,74	7,90	6,06	6,45	8,93	13,12	13,90	9,34	6,81	13
0496	5,10	8,95	8,40	9,36	11,08	11,18	9,19	10,82	7,15	8,78	29
0497	4,08	9,76	10,61	11,33	15,07	7,96	8,53	7,73	9,09	9,54	29
0498	0,80	4,27	2,30	4,22	8,58	4,22	10,15	12,99	11,79	9,77	63
0499	8,26	11,37	7,52	10,32	12,27	9,80	11,78	11,15	7,29	9,21	4
0500	1,73	4,60	8,92	9,53	1,23	21,84	12,05	13,51	11,58	11,16	17
0501	5,56	11,87	14,13	12,63	12,88	5,28	7,06	4,68	12,06	7,39	16
0503	8,41	6,23	12,49	15,21	11,83	10,04	12,23	11,30	7,78	4,48	-6
0504	1,10	2,05	4,12	4,61	7,60	6,24	7,30	8,94	16,38	13,71	50
0511	3,66	5,21	6,68	8,54	9,57	11,52	10,51	10,42	13,62	10,06	25
0512	5,13	7,21	8,02	9,52	9,54	8,03	9,22	10,56	11,21	10,37	21
0513	4,16	5,21	6,31	5,67	6,46	6,92	8,52	11,50	8,41	10,52	63
0515	5,82	4,87	7,28	6,51	8,08	8,02	7,20	10,65	10,41	9,75	38
0516	0,50	1,30	2,08	2,11	5,32	6,17	4,57	3,92	4,88	7,11	80
0524	6,07	8,04	9,55	8,78	11,26	12,69	6,20	6,60	8,73	8,97	29
0527	4,36	5,68	4,98	6,23	5,46	8,44	7,88	7,17	5,24	8,19	54
0529	6,06	6,22	5,92	4,07	4,72	7,17	5,77	9,11	4,06	10,59	67
0530	4,97	6,15	7,49	4,83	7,12	5,86	5,66	8,12	9,18	8,63	54
0534	2,05	6,16	9,45	8,02	7,56	9,24	8,17	10,98	12,03	11,08	21
0535	3,90	11,65	10,44	11,20	12,54	12,68	10,21	9,29	9,37	7,60	4
0541	2,01	12,41	10,98	7,12	8,08	15,09	20,13	10,55	10,15	3,48	0
0542	4,11	8,73	8,12	11,03	14,00	9,02	7,25	7,69	9,43	11,68	13
0546	8,44	10,05	4,47	11,58	9,65	9,30	10,74	4,00	1,50	2,35	104
0549	5,01	6,39	5,02	6,57	11,11	10,46	4,90	4,18	8,38	12,69	65
0550	17,34	17,32	3,38	16,06	9,26	12,51	8,60	6,01	5,57	3,18	5
0552	3,98	9,99	7,85	6,88	8,16	11,02	7,98	6,95	8,46	13,48	19
0557	1,12	9,34	5,97	8,15	10,19	6,92	11,40	8,73	4,56	10,89	58
0563	5,30	9,08	6,65	9,26	9,88	9,50	10,20	6,72	10,46	7,14	79
0565	5,43	5,85	11,42	10,24	6,03	9,40	11,94	9,65	6,29	0,45	92
0567	12,21	9,40	13,26	14,25	16,70	14,51	12,14	6,35	1,18	0,00	29
0571	2,05	7,79	9,73	10,53	6,58	4,48	7,88	6,90	9,69	8,24	22
0572	1,39	6,86	2,82	5,27	7,08	7,79	8,68	4,55	8,51	6,59	87



Apéndice B – Bases de datos de cronogramas

Proy	1/10t	2/10t	3/10t	4/10t	5/10t	6/10t	7/10t	8/10t	9/10t	10/10t	ES
0575	2,94	9,90	7,04	9,08	11,13	12,11	8,69	5,18	10,84	13,97	17
0580	4,57	5,00	8,17	12,75	18,00	14,97	17,74	7,80	6,54	4,46	0
0583	10,51	7,23	5,96	7,52	8,17	10,28	10,84	10,11	6,72	5,16	63
0588	5,63	5,83	5,44	5,52	9,80	8,28	17,10	9,09	8,31	5,04	74
0592	5,41	4,50	12,64	5,06	2,13	6,12	2,51	7,84	13,67	10,83	29
0593	4,55	2,81	3,07	7,81	5,44	3,01	3,00	9,84	6,74	7,45	29
0600	1,11	8,25	8,30	6,57	6,51	6,68	7,94	10,70	12,17	14,72	33
0601	0,95	6,17	5,02	2,95	2,61	7,66	8,42	6,85	8,95	12,81	71
0604	2,36	9,81	7,73	8,29	7,42	10,49	9,91	10,13	10,59	10,21	21
0610	2,77	9,23	7,35	5,74	5,45	8,62	11,43	10,72	12,26	8,51	29
0613	12,61	13,78	14,19	13,92	15,26	12,16	14,75	3,32	0,01	0,00	0
0614	3,03	5,91	4,93	6,66	7,21	9,39	10,45	8,18	11,48	11,65	30
0619	4,73	8,93	8,17	7,42	5,27	8,68	9,63	9,94	7,90	7,97	58
0623	4,06	8,90	10,86	9,27	10,55	6,08	5,35	16,19	12,47	16,27	0
0628	17,62	20,00	16,69	11,00	4,20	11,21	5,27	3,63	2,58	1,91	31
0630	6,67	10,82	8,62	11,88	12,09	8,89	9,71	8,97	11,55	6,70	9
0634	1,23	0,72	4,76	9,62	14,44	16,83	6,20	6,23	24,17	4,33	22
0641	3,02	9,51	6,12	4,20	3,97	10,80	14,39	13,85	15,85	7,22	33
0643	1,94	5,28	3,74	8,58	11,69	9,17	18,16	21,23	9,10	5,28	13
0644	5,05	6,14	6,61	10,74	9,16	6,94	8,33	7,46	7,47	9,15	42
0649	2,77	5,89	9,18	6,20	6,62	6,47	16,46	17,81	9,40	9,59	13
0656	6,75	19,91	17,65	15,99	13,22	9,67	9,32	5,80	1,46	0,23	0
0657	2,20	8,73	6,11	6,87	7,07	8,60	11,13	12,06	9,57	7,41	38
0663	0,77	12,06	10,57	9,83	8,59	5,80	14,80	12,36	11,74	10,77	10
0665	5,91	8,63	7,57	6,99	4,97	10,96	8,73	11,15	10,41	10,80	13
0680	17,41	3,40	9,03	8,87	8,21	8,57	7,14	4,80	8,94	7,17	25
0682	3,86	6,57	5,77	8,97	10,05	12,46	13,92	12,74	8,44	5,82	54
0696	4,52	7,68	15,71	8,78	10,28	7,74	11,83	11,20	8,48	5,47	12
0701	8,97	6,89	20,42	12,99	17,67	8,39	10,61	6,49	4,64	1,83	7
0704	1,10	8,44	7,52	8,66	7,32	7,80	9,39	7,82	13,20	13,50	17



## APÉNDICE C – BASE DE DATOS DE FLUJOS DE CAJA

---

N°	0/10t	1/10t	2/10t	3/10t	4/10t	5/10t	6/10t	7/10t	8/10t	9/10t	10/10t	ES
21	7,97	8,26	11,88	11,01	10,65	10,93	10,48	9,43	9,78	9,90	9,67	24,26
94	8,77	9,41	12,77	12,12	11,92	11,72	11,09	10,64	10,79	11,01	10,41	30,34
108	8,73	9,25	12,37	12,15	11,87	11,76	11,06	10,64	10,81	10,93	10,34	32,42
132	8,48	9,55	10,78	9,77	10,88	8,56	10,35	8,64	8,95	9,75	9,78	18,40
146	8,69	9,33	12,56	12,34	12,00	12,00	10,80	10,34	10,58	10,63	10,21	35,65
176	7,97	8,28	11,67	11,25	10,68	11,15	10,08	9,72	9,54	9,88	9,46	23,41
194	7,89	8,35	11,59	10,95	10,88	10,75	10,42	9,82	9,82	9,92	9,48	25,10
32	9,11	10,36	11,19	11,06	11,72	9,37	11,04	9,47	9,79	10,83	10,74	9,03
38	9,11	10,27	11,38	10,84	11,49	9,44	10,65	9,71	9,53	10,58	10,85	7,71
45	9,64	10,53	11,23	11,18	11,48	9,36	10,76	9,38	9,44	11,08	10,83	7,84
47	9,46	10,40	11,59	10,67	11,69	9,89	10,92	9,69	9,93	11,09	10,53	9,25
58	9,18	10,06	11,18	10,69	11,78	9,76	10,82	9,27	9,88	10,95	10,88	7,85
59	9,27	10,49	11,14	10,88	11,47	9,50	10,83	9,52	9,64	11,06	10,39	7,89
60	9,48	10,33	11,58	11,00	11,58	9,58	11,04	9,39	9,45	10,59	10,75	8,10
71	9,41	10,00	11,43	10,66	11,49	9,69	10,95	9,62	9,59	10,92	10,49	7,93
72	9,16	10,42	11,65	11,09	11,33	9,85	11,09	9,40	9,92	10,96	10,65	9,09
86	9,21	10,13	11,20	10,64	11,77	9,80	11,12	9,76	9,94	10,59	10,78	9,83
93	9,23	10,30	11,40	10,82	11,57	9,79	10,75	9,55	9,47	10,58	10,85	8,20
109	9,67	10,21	11,65	10,91	11,38	9,59	10,94	9,65	9,39	10,70	10,51	8,02
122	9,16	10,00	11,18	10,73	11,37	9,48	10,99	9,61	9,68	10,58	10,54	7,63
123	9,37	10,38	11,61	10,89	11,34	9,87	11,20	9,49	9,93	10,82	10,45	9,74
131	9,32	10,34	11,26	10,79	11,85	9,65	10,92	9,27	9,48	10,67	10,51	8,58
138	9,29	10,20	11,11	10,62	11,83	9,47	11,20	9,75	9,53	10,84	10,66	8,27
140	9,21	10,25	11,55	10,93	11,54	9,39	11,02	9,76	9,57	10,67	10,75	8,63
144	9,16	10,26	11,41	11,07	11,56	9,74	10,90	9,35	9,86	10,59	10,42	8,87
148	9,49	10,23	11,57	10,65	11,33	9,70	11,06	9,52	9,62	11,08	10,52	8,59
171	9,47	10,32	11,21	11,09	11,69	9,39	10,70	9,57	9,86	10,86	10,47	10,12
174	9,29	10,12	11,51	10,74	11,62	9,75	11,07	9,77	9,70	10,59	10,48	9,17

Apéndice C – Base de datos de flujos de Caja

N°	0/10	1/10t	2/10t	3/10t	4/10t	5/10t	6/10t	7/10t	8/10t	9/10t	10/10t	ES
177	9,24	10,43	11,16	10,85	11,67	9,66	10,79	9,71	9,84	10,99	10,46	10,11
181	9,34	10,24	11,49	10,82	11,51	9,67	10,90	9,47	9,68	10,69	10,71	8,82
195	9,36	10,04	11,31	11,00	11,33	9,45	10,69	9,64	9,84	10,91	10,52	9,08
200	9,37	10,16	11,18	10,67	11,33	9,90	10,96	9,27	9,94	11,08	10,52	9,35
205	9,10	10,33	11,47	10,62	11,39	9,37	11,00	9,64	9,74	10,73	10,79	8,17
208	9,40	10,43	11,34	10,90	11,58	9,90	10,70	9,32	9,75	10,71	10,56	9,01
210	9,61	10,35	11,55	11,05	11,84	9,88	10,96	9,44	9,68	11,08	10,80	9,46
212	9,14	10,44	11,46	10,75	11,67	9,36	10,65	9,25	9,90	10,59	10,85	9,11
39	7,12	8,29	10,01	9,40	8,99	8,83	9,59	8,75	8,13	7,96	7,54	4,94
46	8,65	9,17	10,32	9,96	10,93	8,53	9,81	8,96	8,92	10,04	10,03	5,93
51	8,36	9,17	10,44	10,13	10,57	8,50	10,22	8,39	8,64	10,15	9,58	6,34
55	8,47	9,19	10,44	9,87	10,81	8,65	9,88	8,85	8,80	9,80	9,68	6,03
56	8,67	9,17	10,26	10,32	10,80	8,61	10,24	8,88	8,82	10,01	9,84	6,75
62	8,48	9,35	10,63	10,11	10,65	8,82	10,05	8,58	8,64	9,85	9,75	6,52
70	7,54	9,40	10,76	10,40	9,59	9,65	10,33	9,61	9,02	8,50	8,04	8,73
73	6,71	8,08	9,99	9,69	9,19	8,60	9,41	8,79	8,02	7,71	7,17	5,11
79	8,68	9,64	10,62	10,10	10,71	9,00	10,29	8,74	8,56	9,77	9,53	5,71
80	8,28	9,12	10,75	10,04	10,64	8,68	10,21	8,65	8,96	9,70	9,80	4,78
83	8,67	9,35	10,49	9,99	10,76	8,72	9,81	8,66	8,57	9,86	9,69	7,26
87	21,33	6,25	6,33	7,21	7,55	8,22	7,05	7,58	7,64	6,85	6,75	8,52
88	7,19	8,15	9,66	9,47	9,19	8,74	9,46	8,77	7,87	7,87	7,20	4,26
89	8,75	9,27	10,38	10,29	10,92	8,76	10,23	8,75	8,73	9,95	10,03	5,96
95	7,78	9,41	10,58	10,04	9,95	9,16	10,61	9,52	9,05	8,58	7,87	7,98
99	16,67	8,17	9,26	9,32	8,80	8,61	10,24	8,88	8,82	9,01	9,84	6,75
103	7,56	9,21	10,62	10,17	9,59	9,55	10,39	9,40	8,95	8,54	8,25	6,61
124	8,59	9,36	10,62	10,10	10,89	8,97	10,26	8,94	8,88	10,04	9,70	5,18
125	6,68	8,09	9,99	9,68	8,85	8,45	9,44	8,70	7,89	7,69	7,20	4,09
127	8,84	9,51	10,27	10,03	11,01	8,94	10,34	8,78	8,75	10,01	9,59	6,97
133	8,35	9,57	10,67	9,82	10,98	8,56	10,15	8,48	8,71	10,11	10,00	5,75
134	8,41	9,54	10,44	10,23	10,93	8,98	9,81	8,58	8,66	9,95	9,52	5,78
136	8,44	9,63	10,82	10,01	10,49	8,95	10,30	8,64	8,86	9,99	9,75	5,30
160	7,79	9,42	10,89	10,31	9,77	9,36	10,61	9,58	9,11	8,88	8,10	8,50
166	8,76	9,49	10,58	9,89	10,75	8,75	10,35	8,43	8,71	10,02	9,56	5,59

Apéndice C – Base de datos de flujos de Caja

N°	0/10	1/10t	2/10t	3/10t	4/10t	5/10t	6/10t	7/10t	8/10t	9/10t	10/10t	ES
168	8,67	9,57	10,34	9,77	10,80	8,79	9,89	8,84	9,05	10,22	9,75	6,01
169	7,85	9,18	10,95	10,42	9,74	9,19	10,28	9,38	8,74	8,85	8,34	8,34
170	7,00	8,47	9,75	9,19	9,05	8,65	9,33	8,46	7,89	7,51	7,24	4,20
172	7,97	9,19	10,80	10,02	9,69	9,63	10,23	9,42	8,92	8,48	7,89	8,97
173	6,90	8,39	9,60	9,23	8,91	8,69	9,77	8,92	7,84	8,00	7,43	5,80
175	8,56	9,51	10,46	10,13	11,00	8,90	10,30	8,42	8,69	9,92	9,69	6,30
180	8,74	9,34	10,41	10,25	10,97	8,94	10,01	8,92	8,99	9,79	9,54	5,99
182	7,93	9,44	10,44	10,43	10,04	9,16	10,49	9,49	9,11	8,81	8,30	7,75
183	8,56	9,18	10,52	10,09	10,70	8,91	9,93	8,79	8,97	10,05	9,84	5,07
196	8,50	9,17	10,79	10,26	10,67	8,85	10,22	8,91	8,80	9,95	9,59	6,92
197	8,55	9,38	10,78	9,92	10,63	9,06	9,83	8,45	8,76	10,19	9,98	5,61
198	8,27	9,47	10,72	9,89	10,76	8,68	10,20	8,72	8,73	9,84	9,91	6,41
199	8,82	9,20	10,77	10,00	10,69	8,57	9,99	8,68	8,69	10,23	9,82	7,09
201	7,88	9,40	10,63	10,52	9,72	9,62	10,27	9,36	8,83	8,70	8,16	6,59
202	8,65	9,33	10,38	10,17	10,56	8,86	10,14	8,58	8,75	10,12	10,05	5,78
203	8,52	9,17	10,43	10,13	10,58	8,79	9,92	8,72	8,54	9,83	9,78	6,83
206	8,43	9,68	10,65	9,87	10,74	8,78	10,31	8,54	8,82	10,16	9,98	5,01
211	8,46	9,27	10,53	10,10	11,03	8,62	10,33	8,64	8,84	9,70	9,56	5,22
213	8,52	9,32	10,38	9,81	10,97	8,85	10,16	8,72	8,71	9,80	10,04	6,68
214	8,77	9,36	10,42	9,91	10,77	8,81	9,88	8,55	8,79	9,75	10,03	5,42





Apéndice D – Cadenas de Markov

---

$p^{(2)}$	0 1%	1 2%	2 3%	3 4%	4 5%	5 6%	6 7%	7 8%	8 9%	9 10%	10 11%	11 12%	12 13%	13 14%	14 15%	15 16%
0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0,5	0	0,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0,33	0,33	0	0,33	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0,25	0,25	0	0	0	0,5	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0,13	0,13	0,13	0	0	0,25	0,25	0	0	0,13	0	0	0	0
5	0	0	0	0,09	0,18	0,09	0,36	0	0	0,09	0,09	0,09	0	0	0	0
6	0	0	0,1	0	0	0,4	0,1	0,1	0	0,1	0	0	0,1	0	0	0,1
7	0	0	0	0,1	0	0,1	0	0,3	0,1	0,2	0	0,1	0	0	0	0,1
8	0	0	0	0	0	0	0,13	0,13	0,27	0,13	0,27	0,07	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0,09	0,18	0,45	0	0	0,09	0	0	0,18	0	0
10	0	0	0	0	0,33	0	0	0	0,33	0	0,33	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0,25	0	0,25	0	0	0,25	0	0	0	0,25	0
12	0	0	0	0	0	0,25	0	0	0	0	0,75	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0,33	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,67



Apéndice D – Cadenas de Markov

---

$P^{(3)}$	0 1%	1 2%	2 3%	3 4%	4 5%	5 6%	6 7%	7 8%	8 9%	9 10%	10 11%	11 12%	12 13%	13 14%	14 15%	15 16%
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0,33	0	0,33	0,33	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0,4	0	0,2	0,2	0	0	0	0	0	0	0,2
4	0	0	0	0,13	0,13	0	0,38	0,13	0	0,13	0	0,13	0	0	0	0
5	0	0	0,11	0	0,22	0,11	0,11	0,11	0,33	0	0	0	0	0	0	0
6	0,09	0	0	0	0,09	0,27	0,09	0,09	0,18	0,09	0,09	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0,07	0,07	0,43	0,07	0,14	0,14	0,07	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0,13	0,13	0	0,38	0	0,25	0,13	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0,13	0	0,5	0	0,25	0	0,13	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0,09	0	0,18	0,18	0,18	0	0,27	0	0	0	0,09
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,33	0,33	0,33	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,5
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,5	0	0	0	0,5	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,5	0,5	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0,25	0	0	0,25	0,25	0	0	0,25

Apéndice D – Cadenas de Markov

---

p(4)	0 1%	1 2%	2 3%	3 4%	4 5%	5 6%	6 7%	7 8%	8 9%	9 10%	10 11%	11 12%	12 13%	13 14%	14 15%	15 16%
0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0,5	0	0	0,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0,14	0,14	0,14	0	0,29	0,14	0,14	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0,11	0	0,11	0,22	0,22	0,11	0	0,22	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0,08	0,08	0,38	0,15	0,23	0	0	0,08	0	0	0	0
7	0	0	0	0,13	0	0,25	0	0,13	0,5	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0,33	0,07	0,2	0,2	0,13	0	0	0,07	0
9	0	0,1	0	0	0	0	0	0	0,1	0,3	0,2	0,2	0	0	0,1	0
10	0	0	0	0	0,14	0	0,29	0	0	0,29	0	0,14	0,14	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0,14	0,14	0	0,14	0	0	0,29	0	0,14	0,14
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,25	0,25	0	0	0,5
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,25	0	0,25	0	0,25	0	0,25

Apéndice D – Cadenas de Markov

---

$p^{(5)}$	0 1%	1 2%	2 3%	3 4%	4 5%	5 6%	6 7%	7 8%	8 9%	9 10%	10 11%	11 12%	12 13%	13 14%	14 15%	15 16%
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
2	0	0	0	0	0	0	0,5	0,5	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0,5	0	0	0	0	0	0,5	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0,5	0	0	0,25	0,25	0	0	0	0
5	0	0	0	0,14	0	0,43	0	0,43	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0,09	0	0,36	0,09	0,18	0,18	0,09	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0,17	0,08	0,25	0,08	0,17	0,08	0,08	0	0	0,08	0
8	0	0	0	0	0,1	0,1	0	0	0,3	0,1	0,1	0,1	0	0	0	0,2
9	0	0	0	0	0	0	0,08	0,15	0,15	0,31	0,08	0,08	0,08	0	0	0,08
10	0	0	0	0	0	0	0,6	0,2	0	0	0	0	0,2	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0,13	0	0	0,13	0,38	0,13	0,25	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0,25	0	0	0,25	0,25	0	0	0,25	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0,5	0	0	0	0	0	0,5	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0,17	0,17	0	0	0	0,17	0	0,5	0

Apéndice D – Cadenas de Markov

---

$P^{(6)}$	0 1%	1 2%	2 3%	3 4%	4 5%	5 6%	6 7%	7 8%	8 9%	9 10%	10 11%	11 12%	12 13%	13 14%	14 15%	15 16%
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0,5	0	0	0,5	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0,25	0	0,25	0	0,25	0	0	0	0	0,25	0
6	0	0	0,07	0	0,07	0,14	0	0,21	0,14	0,14	0,07	0,07	0	0	0	0,07
7	0	0	0	0	0,09	0,18	0,09	0	0,36	0,09	0,09	0,09	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0,07	0,29	0	0,21	0,07	0,14	0	0,14	0	0,07
9	0	0	0	0	0	0	0	0,23	0,15	0,15	0,23	0,15	0	0	0	0,08
10	0	0	0	0	0,11	0	0	0,11	0,11	0,22	0,11	0	0,22	0	0,11	0
11	0	0	0	0	0	0,2	0	0,2	0	0,2	0,2	0	0	0,2	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0,17	0	0,33	0	0,17	0	0	0,17	0,17	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0,25	0,25	0	0	0	0	0,25	0	0	0,25
15	0	0	0	0	0	0,17	0,17	0	0	0	0	0,17	0,17	0	0	0,33

Apéndice D – Cadenas de Markov

---

P(7)	0 1%	1 2%	2 3%	3 4%	4 5%	5 6%	6 7%	7 8%	8 9%	9 10%	10 11%	11 12%	12 13%	13 14%	14 15%	15 16%
0 1%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1 2%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2 3%	0	0	0	0	0	0	0	0,5	0	0,5	0	0	0	0	0	0
3 4%	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4 5%	0	0	0	0,33	0,33	0	0	0,33	0	0	0	0	0	0	0	0
5 6%	0	0	0	0,14	0	0	0	0,14	0,14	0,14	0,43	0	0	0	0	0
6 7%	0	0	0	0	0	0	0,6	0	0	0,2	0	0	0,2	0	0	0
7 8%	0	0	0	0	0,13	0,07	0,27	0,27	0,07	0	0,2	0	0	0	0	0
8 9%	0	0	0	0	0,09	0,09	0,18	0,36	0	0	0,09	0,18	0	0	0	0
9 10%	0	0	0	0	0	0,08	0,08	0,25	0,17	0,08	0,25	0,08	0	0	0	0
10 11%	0	0	0	0	0,1	0	0,3	0	0,1	0,1	0,2	0	0,2	0	0	0
11 12%	0	0	0	0	0	0	0	0	0,14	0,14	0,14	0,29	0,14	0	0	0,14
12 13%	0	0	0	0	0	0	0,25	0	0	0	0	0,5	0	0,25	0	0
13 14%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,25	0,25	0,5	0	0
14 15%	0	0	0	0,33	0	0	0	0	0	0	0	0	0,33	0,33	0	0
15 16%	0	0	0	0	0	0	0	0,17	0	0,17	0,33	0	0	0	0	0,33

Apéndice D – Cadenas de Markov

---

P <sup>(8)</sup>	0 1%	1 2%	2 3%	3 4%	4 5%	5 6%	6 7%	7 8%	8 9%	9 10%	10 11%	11 12%	12 13%	13 14%	14 15%	15 16%
0 1%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1 2%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2 3%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3 4%	0,25	0,25	0,25	0	0,25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4 5%	0	0	0	0	0	0	0	0	0,75	0	0	0	0,25	0	0	0
5 6%	0	0,25	0	0	0	0	0	0	0	0	0,5	0	0	0,25	0	0
6 7%	0	0,15	0	0,15	0,08	0	0	0	0,31	0,15	0,08	0	0	0	0	0,08
7 8%	0	0	0,07	0	0	0,13	0,13	0,13	0	0,13	0,13	0	0,13	0,13	0	0
8 9%	0	0	0	0	0,17	0	0,17	0	0	0,17	0	0,33	0	0	0	0,17
9 10%	0	0	0	0	0,13	0	0,25	0,13	0,13	0,13	0,25	0	0	0	0	0
10 11%	0	0	0	0	0	0	0,08	0,08	0	0	0,42	0,08	0,25	0,08	0	0
11 12%	0	0	0	0	0	0,13	0	0,25	0,25	0,13	0,13	0	0	0,13	0	0
12 13%	0	0	0	0	0	0	0	0	0,33	0,17	0,17	0,33	0	0	0	0
13 14%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,5	0	0,25	0	0	0	0,25
14 15%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15 16%	0	0	0	0	0	0	0,17	0	0,17	0,33	0	0	0,33	0	0	0

Apéndice D – Cadenas de Markov

---

P <sup>(9)</sup>	0 1%	1 2%	2 3%	3 4%	4 5%	5 6%	6 7%	7 8%	8 9%	9 10%	10 11%	11 12%	12 13%	13 14%	14 15%	15 16%
0 1%	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1 2%	0,5	0	0,25	0	0	0	0	0,25	0	0	0	0	0	0	0	0
2 3%	0	0,5	0	0	0	0,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3 4%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4 5%	0	0,2	0	0,2	0	0	0	0,2	0	0	0,4	0	0	0	0	0
5 6%	0	0	0	0,25	0	0	0,5	0	0,25	0	0	0	0	0	0	0
6 7%	0,14	0	0	0	0,14	0,14	0,14	0,29	0	0	0,14	0	0	0	0	0
7 8%	0	0	0	0	0,17	0	0	0,17	0,17	0,33	0,17	0	0	0	0	0
8 9%	0	0,08	0	0	0,08	0,23	0,08	0,08	0,08	0	0,15	0	0,15	0,08	0	0
9 10%	0	0	0	0	0	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0	0,08	0	0	0	0,08
10 11%	0	0	0	0,14	0	0,07	0	0,14	0,21	0,07	0,14	0	0,07	0,14	0	0
11 12%	0	0	0	0	0	0	0,17	0	0	0,17	0,33	0,33	0	0	0	0
12 13%	0	0	0	0	0	0	0	0,25	0,13	0,13	0	0,25	0	0	0,13	0,13
13 14%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,75	0	0	0,25	0	0
14 15%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
15 16%	0	0	0	0	0,33	0	0	0,33	0	0	0	0	0	0,33	0	0

Apéndice D – Cadenas de Markov

---

$P^{(i0)}$	0 8%	8 16%	16 24	24 32	32 40	40 48	48 56	56 64	64 72	72 80	80 88	88 96	96 104	104 112	112 120	120 128
0 1%	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1 2%	0,5	0	0,25	0	0	0	0	0,25	0	0	0	0	0	0	0	0
2 3%	0	0,5	0	0	0	0,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3 4%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4 5%	0	0,2	0	0,2	0	0	0	0,2	0	0	0,4	0	0	0	0	0
5 6%	0	0	0	0,25	0	0	0,5	0	0,25	0	0	0	0	0	0	0
6 7%	0,14	0	0	0	0,14	0,14	0,14	0,29	0	0	0,14	0	0	0	0	0
7 8%	0	0	0	0	0,17	0	0	0,17	0,17	0,33	0,17	0	0	0	0	0
8 9%	0	0,08	0	0	0,08	0,23	0,08	0,08	0,08	0	0,15	0	0,15	0,08	0	0
9 10%	0	0	0	0	0	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0	0,08	0	0	0	0,08
10 11%	0	0	0	0,14	0	0,07	0	0,14	0,21	0,07	0,14	0	0,07	0,14	0	0
11 12%	0	0	0	0	0	0	0,17	0	0	0,17	0,33	0,33	0	0	0	0
12 13%	0	0	0	0	0	0	0	0,25	0,13	0,13	0	0,25	0	0	0,13	0,13
13 14%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,75	0	0	0,25	0	0
14 15%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
15 16%	0	0	0	0	0,33	0	0	0,33	0	0	0	0	0	0,33	0	0



# APÉNDICE E – PUBLICACIONES Y CONGRESOS

---

# E

## Publicaciones en revistas

- N. Rudeli, E. Viles, J. González, A. Santilli: Causas de Retrasos en Proyectos de Construcción: Un análisis cualitativo, Memoria Investigaciones en Ingeniería, 2018, 16 (1), 71-84  
Latindex
- E.Viles, N.Rudeli, A. Santilli: Causes of delay in construction projects: A quantitative analysis, Engineering, Construction and Architectural Management, Accepted 25/09/2019.  
JCR: Q3 / SJR: Q2
- A. Santilli, N. Rudeli, E. Viles, M. Tanco, D. Jurburg: Comportamiento tipo del desarrollo de obras Cooperativas de viviendas uruguayas, Memoria Investigaciones en Ingeniería, 2017, 15 (1), 71-84  
Latindex
- N. Rudeli, E. Viles, A. Santilli, A Construction Management Tool: Determining a Project Schedule Typical Behaviors Using Cluster Analysis, International Journal of Civil and Environmental Engineering, 2018, 12 (5), 485-492  
IJET-IJENS: Q3 (indexado en Web of Science)

- E.Viles, N.Rudeli, A. Santilli: A taxonomy of construction projects by cash flow behavior, Engineering, Construction and Architectural Management, En revisión  
JCR: Q3 / SJR: Q2
- Rudeli N., Santilli A., Puente I. & Viles E: Statistical Model for Schedule Prediction: Validation in a Housing-Cooperative Construction Database, Journal of Construction Engineering and Management, 2017, 143 (11), 04017083  
JCR: Q2 / SJR: Q1

## Exposiciones en congresos

- **Artículo:** A Construction Management Tool: Determining a Project Schedule Typical Behaviors Using Cluster Analysis  
**Autores:** N. Rudeli, E. Viles, A. Santilli  
**Conferencia:** 20<sup>th</sup> International Conference on Construction Management, Planning and Scheduling.  
**Lugar:** Amsterdam, the Netherlands, Mayo, 2018.

## Menciones – Becas

- **Título:** Beca Jóvenes Profesores Investigadores  
**Agencia de fondos:** Banco Santander  
**Organizaciones participantes:** Tecnum – UM  
**Duración:** Desde 07/11/2016 al 22/12/2016  
**Monto:** 5.000 €
- **Título:** Beca Postgrados en el Exterior en Áreas estratégicas  
**Agencia de fondos:** Agencia Nacional de Investigación e Innovación  
**Organizaciones participantes:** Tecnum – UM  
**Duración:** Desde 07/09/2017 al 29/02/2020  
**Monto:** 30.000 €