

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y DE MATERIALES
SANTIAGO – CHILE



“PROPUESTA METODOLÓGICA PARA ESTIMAR
LOS BENEFICIOS ECONÓMICOS ASOCIADOS A
LA COORDINACIÓN TECNOLÓGICA BIM EN
CODELCO”

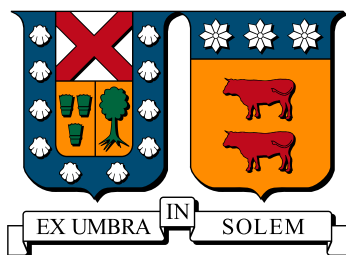
PASCUAL SOTO URIBE

MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL DE MINAS

PROFESOR GUÍA: CARLOS HUNT

ENERO 2020

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y DE MATERIALES
SANTIAGO – CHILE



**“PROPUESTA METODOLÓGICA PARA
ESTIMAR LOS BENEFICIOS ECONÓMICOS
ASOCIADOS A LA COORDINACIÓN
TECNOLÓGICA BIM EN CODELCO”**

PASCUAL SOTO URIBE

**MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL DE MINAS**

PROFESOR GUÍA: CARLOS HUNT

ENERO 2020

Agradecimientos

A mi familia, por su apoyo incondicional.

A los Andes centrales.

Resumen

Abstract

Índice de Contenidos

Agradecimientos	III
Resumen	IV
Abstract	V
Índice de Contenidos	VI
Lista de Tablas	VIII
Lista de Figuras	IX
Glosario	X
1. Introducción	1
1.1. Antecedentes Generales	1
1.1.1. La Metodología BIM	1
1.1.2. La Construcción en el Sector Minero	3
1.1.3. BIM en Codelco	4
1.2. Motivación	5
1.3. Objetivos	6
1.3.1. Objetivo General	6

1.3.2. Objetivos Secundarios	6
1.4. Alcances del Estudio	6
1.5. Metodología de Trabajo	7
1.6. Estructura de la Memoria	8
2. Definición del Problema	9
2.1. Contexto	9
3. Estado del Arte	10
3.1. La metodología BIM	10
3.1.1. Ventajas de la metodología BIM	10
4. Propuesta	12
4.1. Métrica propuesta	12
4.2. Selección y generación de datos	13
4.2.1. Criterio de selección	13
4.2.2. Herramienta de selección y generación de base de datos	15
4.3. Teoría del modelo propuesto	17
4.4. Modelo propuesto	20
4.4.1. Submuestra homogénea	21
4.4.2. Muestra Total	23
4.4.3. Análisis de Resultados	26
Conclusiones	28
Referencias	29

Índice de tablas

1.1. Impacto en los costos de acuerdo a las etapas de un proyecto EPCM según CODELCO.	4
4.1. Palabras clave para la selección de cada ítem asociado al BIM.	15
4.2. Desviaciones en costo de los proyectos estudiados.	15
4.3. Nivel de madurez BIM de cada proyecto.	16
4.4. Base de datos desviación de costos (crecimientos) e indicador madurez. . .	17
4.5. Estadísticas asociadas al coeficiente de madurez BIM θ_1	23
4.6. Estadísticas asociadas al coeficiente de madurez BIM θ_1	25

Índice de figuras

4.1. Predicción de la desviación en costos en base a la submuestra homogénea. .	23
4.2. Predicción de la desviación en costos en base a la muestra total.	25
4.3. Diferencia de predicciones entre el modelo propuesto en base a la submuestra homogénea (línea roja) y a la muestra total (línea azul).	26

Glosario

Interferencias: problemas que ocurren entre los planos de distintas especialidades, generando conflictos presentados entre los distintos objetos 3D que conforman la modelación.

SDI: solicitud de información.

Capítulo 1

Introducción

1.1. Antecedentes Generales

1.1.1. La Metodología BIM

BIM es el acrónimo de *Bulding Information Modeling*, que traducido al español quiere decir Modelado de Información de la Construcción, el cual hace referencia al proceso de generación y gestión de datos de una construcción durante su ciclo de vida utilizando algún *software* dinámico de modelado en tres dimensiones y en tiempo real para disminuir la pérdida de tiempo y recursos en el diseño de la construcción. Este proceso produce el modelo de información de la construcción (al que se le conoce como modelo BIM), que abarca tanto la geometría de la construcción, las relaciones espaciales y la información geográfica, así como también las cantidades, las propiedades y atributos de cada uno de los componentes integrados en el modelo.

En otras palabras, el BIM representa un espacio virtual compartido de lo que será construido y su entorno, el que, además, está asociado a las herramientas (*software*), métodos (procedimientos de operación) y análisis (estructural, chequeo de interferencias, construcción, etc.) relacionados con dicho modelo (Saldías, 2010).

En esta línea, y para el propósito de esta Memoria, la definición de BIM que mejor se ajusta al trabajo realizado es la que propone el National Building Information Model Standard Project Committee (2019), que postula al BIM como una representación digital de las características físicas y funcionales de un proyecto. Así, el BIM es un fuente compartida de conocimiento e información sobre dicho proyecto, constituyendo una base confiable para la toma de decisiones durante el ciclo de vida de este.

Una premisa básica del BIM es la colaboración entre los actores involucrados durante las diferentes fases del ciclo de vida del proyecto, ya sea para insertar, extraer, actualizar o modificar algún tipo de información en el modelo BIM para apoyar los roles de cada actor.

Así, los requerimientos para que el modelo BIM sea intercambiable están basados en: una representación digital compartida, que la información contenida en el modelo sea interoperable (es decir, que permita intercambios entre distintos computadores), que los intercambios estén basados en estándares abiertos y comunes a la industria, y que los requerimientos de los intercambios puedan ser definidos en lenguaje contractual.

En términos prácticos, el BIM puede interpretarse de manera diferente dependiendo de la perspectiva de cada actor:

- Aplicado a un proyecto, el BIM representa la gestión de la información. Es decir, los datos contribuidos y compartidos por todos los participantes del proyecto. La información correcta para la persona correcta en el tiempo correcto.
- Para los participantes del proyecto, el BIM representa un proceso interoperable para la entrega del proyecto. Es decir, define el trabajo de los equipos y cuántos equipos deben trabajar en conjunto para concevir, diseñar, construir y operar el proyecto.
- Para el equipo de diseño, el BIM representa un diseño integrado. Es decir, hace uso de soluciones tecnológicas, incentivando la creatividad, entregando *feedback* y empoderando a los equipos.

1.1.2. La Construcción en el Sector Minero

Según lo establecido por la Comisión Chilena del Cobre (2018) en su informe de inversión en la minería chilena, que considera aquellos proyectos con puesta en marcha dentro del período 2018 – 2027, existen 44 iniciativas avaluadas en unos US\$ 65.747 millones.

Estas 44 iniciativas se pueden dividir en dos grupos: aquellas con una mayor probabilidad de materializarse dentro de los plazos presupuestados, y aquellas cuya probabilidad de materializarse es menor.

Dentro del primer grupo se encuentran las iniciativas en condición base y probable, que suman un total de US\$ 36.257 millones con 25 proyectos, los cuales corresponden a un 55,1 % del total de la cartera.

En el segundo grupo se encuentran aquellos proyectos en condición posible, potencial y los más propensos a verse afectados por cambios en las condiciones de mercado. Corresponden a 19 iniciativas valoradas en US\$ 29.490 millones, que equivalen al 44,9 % del total de la cartera.

Si se adopta una postura pesimista y sólo se consideran los proyectos del primer grupo, se puede hacer un análisis separado de aquellas iniciativas en condición base y probable. Así, las iniciativas en condición base cuentan con 14 proyectos, cuya inversión asciende a los US\$ 21.931 millones, siendo CODELCO el actor principal con un 68,8 % de la inversión para esta condición. Por otro lado, existen 14 iniciativas en condición probable avaluadas en US\$ 14.326 millones, donde la gran minería privada es la de mayor relevancia con un 91 % del total de la inversión para esta condición.

Para estudiar los montos asociados exclusivamente a la etapa de construcción, se toman en cuenta los porcentajes de impacto en los costos de un contrato EPCM establecidos por CODELCO para cada una de las etapas de dicho contrato. De esta manera, al asociar los porcentajes a los proyectos en condición base y probable se generan los siguientes resultados:

Tabla 1.1: Impacto en los costos de acuerdo a las etapas de un proyecto EPCM según CODELCO.

Etapas	% de impacto en costos	Proyectos condición base y probable, MM USD	Proyectos condición base, MM USD
Ingeniería	10 %	\$ 3.626	\$ 2.193
Adquisición	50 %	\$ 18.129	\$ 10.966
Construcción	35 %	\$ 12.690	\$ 7.676
Gestión	5 %	\$ 1.813	\$ 1.097

MM USD = millones de dólares. Fuente CODELCO Chile.

Tal como se aprecia, la etapa de construcción es la que tiene el segundo mayor impacto en los costos de un contrato EPCM, alcanzando un 35 % de los costos totales de un proyecto.

Así, la inversión asociada a los proyectos en condición base y a la agrupación de proyectos en condición base y probable, representan un 7,35 % y un 12,16 % respectivamente del PIB de Chile en 2018¹.

1.1.3. BIM en Codelco

Tras un proceso gradual de implementación de metodologías y tecnologías BIM — que partió en 2010 con la incorporación de procesos de gestión documental y empleo de modelos 3D para el diseño de proyectos estructurales y de mantenimiento de instalaciones, en los que se entendía el BIM no sólo como un software, sino como una forma de gestionar información— Codelco suscribe el “Acuerdo de Colaboración y Complementación de Capacidades para Incrementar la Productividad de la Industria de la Construcción” con Planbim de Corfo en 2018 con el fin de aumentar la productividad y eficiencia en sus proyectos.

El convenio busca fomentar la incorporación de procesos, estándares y tecnologías

¹Dato extraído del Banco Mundial <https://datos.bancomundial.org/pais/chile>

de información y comunicaciones, junto con metodologías BIM, para generar un cambio metodológico que integre habilidades y capacidades a los trabajadores mediante el uso de nuevas tecnologías y trabajo colaborativo e interdisciplinario, que permitan la integración de la gestión de proyectos y el manejo optimizado de información a lo largo del ciclo de vida completo de los activos, desde su diseño hasta su operación.

Así, y con el fin de convertirse en la institución que realiza los proyectos más productivos del país, es que Codelco emitió un mandato corporativo durante el primer semestre del 2019, en el que se indica el uso obligatorio de la metodología BIM para todos los proyectos de la corporación.

1.2. Motivación

Las iniciativas en estado base y probable proyectadas para el período 2018 – 2027 representan un 12,16 % del PIB nacional del año 2018. Asimismo, de acuerdo las ponderaciones mostradas en la Tabla 1.1, los costos asociados a la etapa de construcción de estos proyectos representa un 4,26 % del PIB registrado en 2018.

Tales cifras muestran la importancia de diseñar, construir y gestionar los proyectos de manera eficiente. Para ello, Codelco ha establecido el uso del BIM con el fin de, entre otros, ajustarse a los costos inicialmente proyectados como presupuesto base.

Sin embargo, hasta ahora no existe una manera cuantitativa de estimar si el uso del BIM efectivamente contribuye a ajustarse a los costos inicialmente presupuestados, o bien cuál es el beneficio económico asociado al uso de dicha tecnología. Esta falencia es la que ha motivado la realización de este estudio.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

- Proponer un método cuantitativo para estimar el beneficio económico asociado al uso del BIM, proyectando los sobrecostos de un proyecto respecto de su presupuesto inicial según el nivel de madurez BIM alcanzado por dicho proyecto.

1.3.2. Objetivos Secundarios

- Proponer un indicador de madurez BIM que relacione la desviación en los costos de un proyecto y según su nivel de madurez.
- Desarrollar un *script* para mejorar la estimación de los parámetros de la relación entre madurez BIM y desviación en los costos.

1.4. Alcances del Estudio

Para el desarrollo de este trabajo se consideró la desviación de los costos asociada a la etapa de construcción de los proyectos estudiados, la que fue extraída del detalle de los contratos en sus etapas iniciales y finales. Esto de acuerdo al requerimiento establecido por Codelco, cuya prioridad era conocer el impacto de la implementación del BIM en los costos de construcción de un proyecto.

Además, la muestra sobre la que se trabajó es muy acotada —tres proyectos de construcción de plantas minero-industriales—, sin embargo, el fin de este estudio no es entregar un modelo cuyo rigor estadístico permita su generalización, sino más bien proveer una metodología capaz de predecir los sobrecostos de un proyecto bajo cualquier contexto (construcción industrial, construcción comercial, etc) considerando solamente su nivel de madurez BIM, independiente de la escala que use para medirla.

1.5. Metodología de Trabajo

El desarrollo de la propuesta aquí presente se realizó de la siguiente manera:

- Proposición del tema por parte de Codelco. Codelco necesitaba conocer de manera cuantitativa las ventajas de la utilización del BIM, dado que el uso de la tecnología BIM estaba asociada a una “sensación” de ahorro que necesitaba ser cuantificada.
- Revisión bibliográfica y búsqueda en la literatura para conocer las maneras de medir cuantitativamente los beneficios asociados a la implementación del BIM en los diferentes proyectos de construcción en el mundo.
- Reuniones semanales con el jefe del área BIM en Codelco para evaluar los avances en la propuesta y recibir *feedback* sobre el trabajo realizado.
- Minería de datos para establecer los sobre costos en los proyectos estructurales realizados con BIM en la Vicepresidencia de Proyectos y así poder generar un vector de desviaciones en los costos de cada uno de los proyectos en la etapa de construcción.
- Reuniones con el experto y coordinador BIM de los proyectos estudiados para conocer el *rating* de madurez de cada proyecto con el fin de generar un vector de *ratings* de madurez BIM.
- Desarrollo de un indicador de madurez consecuente con la relación inversa entre madurez BIM y desviación de los costos de un proyecto.
- Utilización de técnicas predictivas, en particular, mínimos cuadrados ordinarios, para generar un modelo capaz de predecir las desviaciones de costos en la etapa de construcción de los proyectos de acuerdo al nivel de madurez BIM alcanzado por cada uno de ellos.
- Presentación de resultados ante comisión experta de la Cámara Chilena de la Construcción, el jefe BIM de Codelco y el equipo BIM de la Vicepresidencia de Proyectos.
- Entrega de informe con las conclusiones y sugerencias pertinentes.

1.6. Estructura de la Memoria

El presente trabajo de Memoria se estructura de la siguiente manera:

Capítulo 2

Definición del Problema

2.1. Contexto

Capítulo 3

Estado del Arte

3.1. La metodología BIM

Ejemplos con \cite: Lu et al. (2014); (Lu et al., 2014); Lu et al. (2014) y Lu et al., 2014.

3.1.1. Ventajas de la metodología BIM

La metodología BIM, considerada como plataforma de coordinación, puede tener dos efectos en el comportamiento de un contrato (Chang y Howard, 2014):

1. Digitalizar el diseño en un conjunto de objetos paramétricos 3D podría reducir la incidencia de malas interpretaciones de la información del diseño provenientes de errores humanos durante la transferencia de información. Digitalizar reduce, de manera inherente, la incidencia en las órdenes de cambio, lo que permite que el dueño del proyecto esté menos expuesto a retrasos en los pagos.
2. El uso de la metodología BIM podría hacer posible que las empresas subcontratistas incorporasen sus inputs en el diseño digital durante una etapa temprana. Además, el uso de BIM facilita la detección de interferencias que podrían resultar en un cambio

durante la etapa de construcción. Todo lo anterior también impacta en la reducción de la exposición a cambios indeseados del dueño.

Capítulo 4

Propuesta

4.1. Métrica propuesta

Si bien el fin de este trabajo es postular un método cuantitativo capaz de estimar y predecir los beneficios económicos asociados al uso del BIM en los proyectos de construcción minero-industriales en Codelco, el propósito general es que dicho método se pueda extender a cualquier tipo de proyecto de construcción, ya sea minero, industrial, de construcción habitacional, etc.

Además, dado el reducido número de proyectos que han adoptado la metodología BIM en Codelco, es esencial que el método propuesto desestime el uso de un contrafactual para validarse, puesto que dicho método debe ser capaz de producir un modelo que pueda predecir los beneficios económicos en base al contexto particular de la industria de interés.

En este sentido, un método como el Barlish y Sullivan (2012), donde los indicadores propuestos permiten aventurar conclusiones en base a la comparación del nivel que estos alcanzaron en proyectos con BIM versus proyectos sin BIM, tiene la desventaja de necesitar de un contrafactual para validarse. Por otro lado, un método como el propuesto por Saldías (2010), que levanta conclusiones en base a la cantidad de SDIs y órdenes de cambio que pudieron haberse evitado con el uso de la metodología BIM, tiene la desventaja de comparar

proyectos sin BIM contra el ideal esperado con el uso de BIM, sin tomar en cuenta los puntos intermedios de proyectos que utilizan al menos algún nivel de esta metodología.

Por esta razón, este trabajo propone una metodología y una métrica que toman en cuenta las limitaciones mencionadas, es decir, desestima el uso de un contrafactual y considera niveles intermedios del uso del BIM, y que, además, utiliza métodos estadísticos para validarlas.

La métrica propuesta sigue una línea metodológica similar a la mostrada por Lu et al. (2012), donde el indicador es un parámetro derivado otros indicadores, que son los esfuerzos (medidos en HH) y la superficie por unidad de trabajo (m^2).

Así, en vez de construir un modelo en base a indicadores que pueden extraerse de manera directa de los reportes de los proyectos, el modelo propuesto utiliza una métrica que toma en cuenta el nivel de madurez BIM alcanzado (de acuerdo a una escala previamente determinada), el nivel óptimo de madurez y la desviación de los costos de los proyectos.

Asimismo, y dado que se espera que los costos de un proyecto crezcan en relación inversa al nivel de madurez BIM alcanzado por este, es necesario que el indicador se compare con respecto a su nivel de madurez óptimo. Formalmente, esto queda:

$$\text{Indicador Madurez} = \frac{\text{Madurez BIM óptima}}{\text{Nivel madurez BIM}} \quad (4.1)$$

4.2. Selección y generación de datos

4.2.1. Criterio de selección

Para poder generar un modelo que permita validar el uso del indicador propuesto, la información sobre la cuál se compara dicho parámetro es la desviación de los costos en un proyecto determinado, y, en particular, la desviación en costos que tenga relación directa con la falta de integración de la metodología BIM. En otras palabras, la información relevante es la relativa a todos aquellos factores que devinieron en un aumento de costos y que pudieron

evitarse de haberse utilizado e integrado el BIM de manera óptima.

De esta manera, la selección de los datos utilizados para relacionar estas variables y generar un modelo capaz de predecir la desviación en costos basados en la métrica propuesta tuvo dos fuentes principales de las cuales se extrajo la información: el reporte final de los proyectos con los cambios y tendencias, y el detalle de los contratos de cada proyecto.

Sin embargo, dado el nivel de detalle de la información contenida, se escogió el reporte con el detalle de los contratos como fuente de extracción de datos. Además, dicho reporte separa el detalle del costo base y el costo final. Esta clasificación permite generar una estructura de filtrado de datos que sigue la siguiente selección jerarquizada:

1. **Contratos que crecieron:** primero, se seleccionan todos los contratos que experimentan un crecimiento en sus costos respecto del presupuesto base.
2. **Sólo crecimientos:** luego, se considera sólo la información referida a los crecimientos de los costos de cada contrato, desestimándose la información detallada sobre el costo base de estos.
3. **Itemización BIM:** finalmente, se separa la información por ítems relacionados al uso (o falta de uso) de BIM. La itemización BIM se compone de los siguientes ítems: extensión de plazo, obras adicionales, materiales e ingeniería.

La selección de información asociada a cada uno de los ítems de la itemización BIM puede variar según el proyecto. Sin embargo, para el caso de los proyectos analizados en este estudio, las palabras clave para dicha selección eran coincidentes entre proyectos. Esto dado que quienes crean el reporte son parte de la misma Dirección (Dirección de Contratos) y de la misma compañía (Codelco).

Se tiene, entonces, que para el filtrado por ítem, las palabras clave fueron:

Tabla 4.1: Palabras clave para la selección de cada ítem asociado al BIM.

Ítems	Palabras clave
Extensión de plazo	Extensión plazo, plazo
Obras adicionales	Montaje, obras adicionales, rellenos, reemplazos, reparaciones, etc.
Materiales	Hormigón, piping, cañerías, cables, válvulas, etc.
Ingeniería	Ingeniería, ingeniería de terreno, etc.

Una vez seleccionada toda la información asociada a cada ítem, se calcula el porcentaje que representa cada uno de ellos respecto del presupuesto base y se genera un nuevo set de datos que representa la desviación en costos asociada al uso del BIM por cada uno de los proyectos.

Luego, las desviaciones en costos para los proyectos estudiados en este trabajo se distribuyen de acuerdo a lo mostrado en la siguiente Tabla:

Tabla 4.2: Desviaciones en costo de los proyectos estudiados.

Ítem	MH	Molyb	Planta de Ácido
Extensión plazo	2,0 %	5,4 %	-
Obras adicionales	19,7 %	2,4 %	5,6 %
Materiales	3,2 %	8,1 %	5,9 %
Ingeniería	0,08 %	0,12 %	0,3 %
Total	25,0 %	16,2 %	11,8 %

4.2.2. Herramienta de selección y generación de base de datos

El reporte con el detalle de los contratos es una planilla Excel con miles de datos, por lo que el filtrado a través de este mismo software no es conveniente. Por esta razón, se creó un código en Python para la selección de los datos requeridos a través de una pseudo minería

de datos ¹. Cabe mencionar que si bien el código se creó para trabajar con cualquier reporte de detalle de contratos emitidos por la Vicepresidencia de Proyectos de Codelco, basta con ajustar algunos parámetros para que dicho código pueda usarse con un reporte de similares características de cualquier otra compañía.

Así, una vez generado el conjunto de datos asociado a las desviaciones en costos, se procede a estimar los resultados arrojados por la métrica propuesta. Para ello, se consultó la opinión experta de Marcelo Vásquez, quien fue el coordinador BIM de todos los proyectos estudiados.

Ha de mencionarse que la madurez BIM se puede medir usando la métrica o metodología que más convenga, sin embargo, en este estudio se decidió por el uso de la matriz de madurez propuesta por Succar (Succar, 2010). Dicha matriz entrega un rating que va del 1 al 4, siendo 4 el óptimo de madurez. Bajo este contexto, la evaluación de Marcelo Vásquez para los proyectos fue la siguiente:

Tabla 4.3: Nivel de madurez BIM de cada proyecto.

Proyecto	Nivel de madurez BIM
Ministro Hales	1,7
Moly corporativo	2,2
Planta de ácido	1,8

Aplicando la transformación propuesta como indicador (a la que en adelante se referirá como madurez por simplicidad), el conjunto de datos sobre los que se levanta la propuesta de este estudio queda como sigue:

¹Disponible en www.github.com/psotou/contract-data-selection.git

Tabla 4.4: Base de datos desviación de costos (crecimientos) e indicador madurez.

Proyecto	Desviación	Madurez
Ministro Hales	25,0 %	2,35
Moly corporativo	16,2 %	1,82
Planta de ácido	11,8 %	2,22

En base a esta información se construye el modelo que permite predecir la desviación en costos de un proyecto de acuerdo a su nivel de madurez BIM.

4.3. Teoría del modelo propuesto

En términos generales, la relación entre desviación en costos de un proyecto i y los factores que la motivan se puede expresar de la siguiente manera:

$$y_i = \theta_0 + \sum_{i=1}^n \theta_i x_i \quad (4.2)$$

O bien, de manera vectorial:

$$y_i = \mathbf{x}_i^T \boldsymbol{\theta} \quad (4.3)$$

Donde tanto y_i como \mathbf{x}_i son variables observadas. Se asumirá que ε_i (término de error o de perturbación no observado) es absorbido por la constante θ_0 . Aquí, \mathbf{x}^T es un vector fila cuyos elementos son los indicadores de madurez propuestos ($1, x_1, x_2, \dots, x_n$), y $\boldsymbol{\theta}$ es un vector columna con $(\theta_0, \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n)^T$ parámetros desconocidos que son los que se desea estimar para generar un modelo capaz de explicar la influencia de factores tales como el uso de alguna nueva metodología (que es el caso de este estudio), clima, paralizaciones, etc, en la desviación de los costos de un proyecto y, adicionalmente, predecir este resultado.

En este trabajo, y_i representa las desviaciones en costos para el proyecto i , y x_i es el indicador de madurez propuesto.

Además, la ecuación (4.3) se puede escribir usando notación matricial:

$$\mathbf{y} = \mathbf{X}\boldsymbol{\theta} + \boldsymbol{\varepsilon} \quad (4.4)$$

Donde \mathbf{y} y $\boldsymbol{\varepsilon}$ son vectores de dimensiones $(N \times 1)$, \mathbf{X} es una matriz de dimensión $(N \times K)$ y $\boldsymbol{\theta}$ un vector de dimensión $(K \times 1)$.

Antes de comenzar con la estimación de los parámetros de interés $\boldsymbol{\theta}$, se deben levantar algunos supuestos para darle significado al modelo de manera que este no carezca de sentido estadístico. En primer lugar, se asume que las variables explicativas x_i son exógenas, lo que implica que $E[y_i|x_i] = 0$. Bajo este supuesto, se sostiene que :

$$E[y_i|x_i] = \mathbf{x}_i^T \boldsymbol{\theta} \quad (4.5)$$

De manera que la curva $\mathbf{x}_i^T \boldsymbol{\theta}$ describe la esperanza condicional de y_i dados los valores de x_i , y los coeficientes de $\boldsymbol{\theta}$ miden cuánto cambia el valor esperado de y_i si cambia un valor x_{ik} (siendo éste el k -ésimo elemento del vector x_i) manteniendo todos los otros elementos de x_i constantes (condición ceteris paribus) (Verbeek, 2004).

Los parámetros de $\boldsymbol{\theta}$ se estimarán on el estimador de Mínimos Cuadrados Ordinarios (MCO). Utilizando la notación de la ecuación (4.4), el estimador está dado por:

$$\hat{\boldsymbol{\theta}} = (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{y} \quad (4.6)$$

Luego, la predicción de valores de desviación vendrá dada por:

$$\hat{\mathbf{y}} = \mathbf{X}\hat{\boldsymbol{\theta}} \quad (4.7)$$

Donde \hat{y} son las predicciones de las desviaciones dada la estimación de los parámetros de θ .

La muestra sobre la cual se funda este estudio consiste de un conjunto muy reducido de datos, por lo que se utilizará MCO para muestra pequeña. Las propiedades del estimador MCO para muestra pequeña son:

$$E[\varepsilon_i] = 0 \quad (4.8)$$

$$\varepsilon_i \text{ independiente de } x_i \quad (4.9)$$

$$V[\varepsilon_i] = \sigma^2 \quad (4.10)$$

$$\text{cov}[\varepsilon_i, \varepsilon_j] = 0, \quad i \neq j \quad (4.11)$$

El supuesto (4.8) indica que el valor esperado del término de error es cero, esto significa que, en promedio, la curva de regresión debería estar correcta. El supuesto (4.10) indica que todos los términos de error poseen la misma varianza, esto se conoce como homocedasticidad, mientras que supuesto (4.11) impone cero correlación entre los términos de error, excluyendo así cualquier forma de autocorrelación. Usando la notación matricial, estos tres supuestos se pueden reescribir de la siguiente forma:

$$E[\varepsilon] = 0 \quad \text{y} \quad V[\varepsilon] = \sigma^2 I_N \quad (4.12)$$

Con I_N matriz identidad de dimensiones $(N \times N)$. Esto muestra que la matriz de covarianza del vector de los términos de error ε es una matriz diagonal con σ^2 en la diagonal.

El supuesto (4.9) indica que X e ε son independientes. Este es un supuesto fuerte que implica:

$$E[\varepsilon|X] = E[\varepsilon] = 0 \quad (4.13)$$

$$V[\varepsilon|X] = V[\varepsilon] = \sigma^2 I_N \quad (4.14)$$

Es decir, la matriz de regresores X no provee ninguna información sobre los valores esperados de los términos de error o sus (co)varianzas.

Una propiedad muy relevante del estimador de mínimos cuadrados es que se trata de un **estimador insesgado**. Esto quiere decir que, en promedio, se espera que los valores del estimador $\hat{\theta}$ sean iguales a los valores verdaderos de θ (Verbeek, 2004). Formalmente, esto es:

$$E[\hat{\theta}] = \theta \quad (4.15)$$

Hasta ahora se ha descrito la interpretación del modelo para un valor esperado de y_i dados los valores observado de las variables explicativas \mathbf{x}_i .

Además de ese análisis, es importante conocer el **efecto marginal** de dichas variables sobre el valor esperado de y_i . En otras palabras, en cuántas unidades se espera que cambie y_i si x_{ik} cambia en una unidad siempre que el resto de las variables en \mathbf{x}_i se mantenga constante (condición ceteris paribus) (Hansen, 2018). Esta medida viene dada por:

$$\frac{\partial E[y_i|\mathbf{x}_i]}{\partial x_{ik}} = \theta_k \quad (4.16)$$

4.4. Modelo propuesto

La coordinación digital de un proyecto de construcción a través del uso de la metodología BIM supone reducir los costos asociados a errores, interferencias, omisiones, etc, por lo que a medida que el grado de integración de la metodología en el proyecto crece, los costos asociados a los problemas mencionados disminuyen.

Dado este escenario, es de esperarse que el uso del BIM impacte de manera positiva en el ahorro en costos de construcción de un proyecto. Se desprende, entonces, que un proyecto que alcanza un buen nivel de madurez BIM debería tener un sobre costo menor al esperado en un proyecto realizado sin BIM.

Por lo anterior, la hipótesis sobre la que se basa esta propuesta es que la desviación de los costos de un proyecto es inversamente proporcional a su grado de madurez BIM. Para ello, se define la variable explicativa x_{ik} de la siguiente manera:

$$x_{ik} = \frac{m}{m_i} \quad (4.17)$$

Donde m es el óptimo de madurez BIM, y m_i es el nivel de madurez BIM alcanzado por el proyecto i .

Con esto, la ecuación (4.2) queda:

$$y_i = \theta_0 + \sum_{i=1}^n \theta_i \left(\frac{m}{m_i} \right) \quad (4.18)$$

Además, la desviación en los costos de un proyecto está sujeta las siguientes condiciones de borde de acuerdo a la NBS (NBS, 2018):

$$y_i = \begin{cases} 0,33 & \text{si } m_i = m_{\text{máx}} \\ 0,001 & \text{si } m_i = m_{\text{mín}} \end{cases} \quad (4.19)$$

La muestra de la que se disponía y sobre la que se trabajó, consistía de tres proyectos minero-industriales, dos de estos proyectos de construcción greenfield mientras que el otro, un proyecto de overhauling. Por esta razón, se realiza un análisis para la submuestra de elementos homogéneos y otro para el total de la muestra.

4.4.1. Submuestra homogénea

Este análisis considera la submuestra de los proyectos greenfield, que además compartían la construcción del mismo número de plantas de procesamiento, aunque para minerales distintos. Los datos de desviación de costos, madurez BIM y condiciones de borde son los siguientes:

$$Y = \begin{bmatrix} 0,330 \\ 0,249 \\ 0,161 \\ 0,001 \end{bmatrix}$$

$$X = \begin{bmatrix} 1 & 4,000 \\ 1 & 2,353 \\ 1 & 1,818 \\ 1 & 1,000 \end{bmatrix}$$

Esto genera el estimador:

$$\hat{\theta} = \begin{bmatrix} -0,0532 \\ 0,1040 \end{bmatrix} \quad (4.20)$$

Este resultado genera la siguiente relación:

$$y_i = -0,0532 + 0,104 \cdot \left(\frac{4}{m_i} \right) \quad (4.21)$$

Cuyo efecto marginal sobre la desviación esperada de los costos es 0,104. Es decir, por cada una unidad de madurez BIM se espera una reducción en la desviación esperada de aproximadamente un 10,4 %.

La escala con la que se mide madurez BIM para este estudio toma valores que van desde el 1 al 4, con un error asociado de $\pm 0,05$. Tomando en cuenta este rating, se genera un gráfico con la predicción de la desviaciones en costos en base al nivel de madurez.

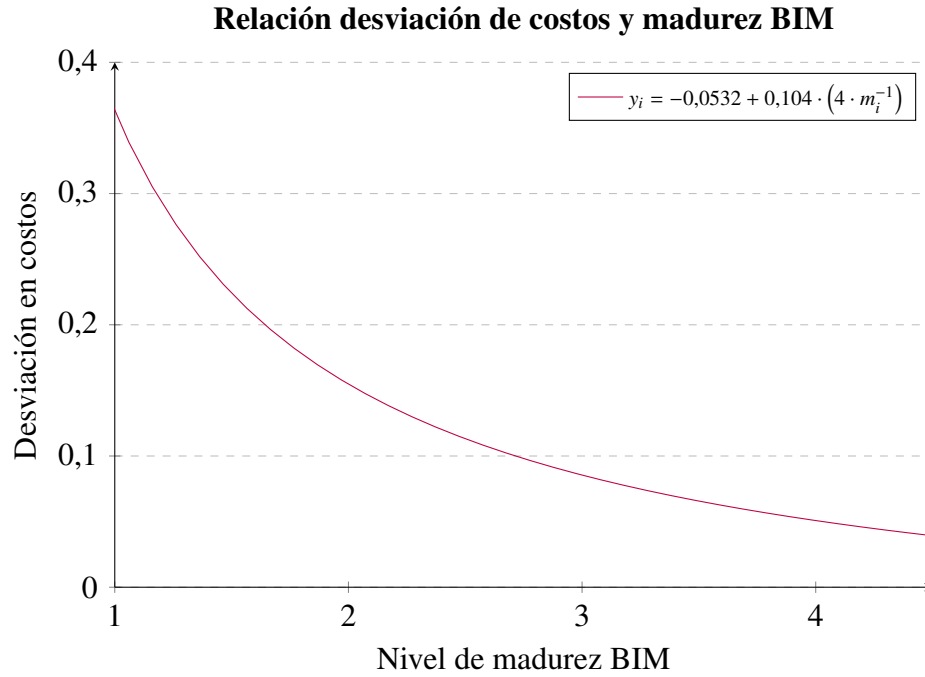


Figura 4.1: Predicción de la desviación en costos en base a la submuestra homogénea.

Las estadísticas asociadas al coeficiente que acompaña la relación de madurez BIM se muestran en la siguiente Tabla:

Tabla 4.5: Estadísticas asociadas al coeficiente de madurez BIM θ_1 .

Coeficiente	error estándar	p -value	R^2
0,104	0,028	0,065	0,87

4.4.2. Muestra Total

Ahora, ingresando los datos de desviación y madurez de toda la muestra, se generan las siguientes matrices:

$$Y = \begin{bmatrix} 0,330 \\ 0,249 \\ 0,161 \\ 0,118 \\ 0,001 \end{bmatrix} \quad X = \begin{bmatrix} 1 & 4,000 \\ 1 & 2,353 \\ 1 & 1,818 \\ 1 & 2,222 \\ 1 & 1,000 \end{bmatrix}$$

Lo que produce el siguiente estimador:

$$\hat{\theta} = \begin{bmatrix} -0,0667 \\ 0,1047 \end{bmatrix} \quad (4.22)$$

Con lo que la relación entre desviación y madurez se modela como sigue:

$$y_i = -0,0667 + 0,1047 \cdot \left(\frac{4}{m_i} \right) \quad (4.23)$$

Cuyo efecto marginal sobre la desviación esperada de los costos es 0,1047. Es decir, por cada una unidad de madurez BIM se espera una reducción en la desviación esperada de aproximadamente un 10,5 %.

El gráfico asociado a la ecuación (4.23) es:

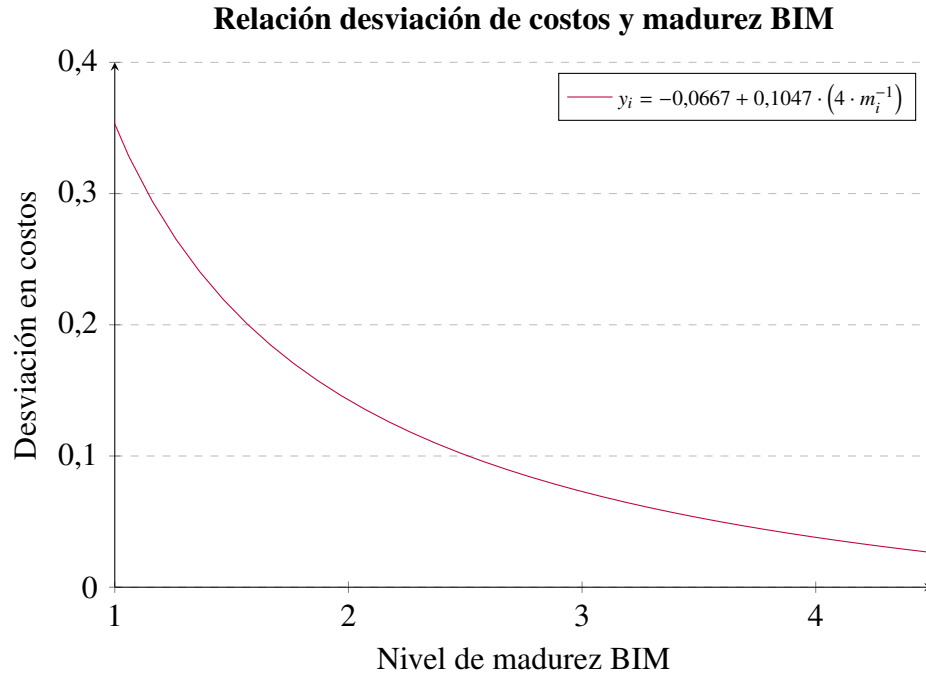


Figura 4.2: Predicción de la desviación en costos en base a la muestra total.

Y las estadísticas asociadas al coeficiente que acompaña la relación de madurez BIM se muestran en la siguiente Tabla:

Tabla 4.6: Estadísticas asociadas al coeficiente de madurez BIM θ_1 .

Coeficiente	error estándar	p -value	R^2
0,1047	0,027	0,03	0,83

Si se comparan las curvas generadas a partir tanto de la submuestra como de la muestra total, se puede apreciar un desplazamiento en favor de la curva generada por el modelo derivado de la muestra total (pues se acerca más a las condiciones de borde que indica la teoría).

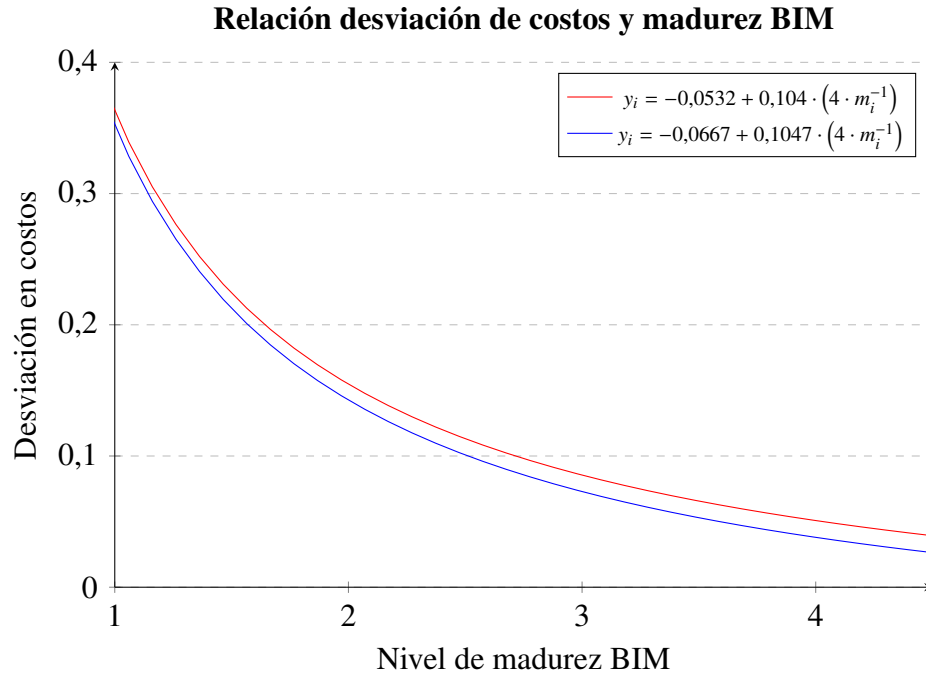


Figura 4.3: Diferencia de predicciones entre el modelo propuesto en base a la submuestra homogénea (línea roja) y a la muestra total (línea azul).

4.4.3. Análisis de Resultados

Como se mencionó más arriba, la propuesta de este estudio se basa en mostrar la relación inversa entre desviación de costos y madurez BIM y, junto a esto, validar la métrica propuesta a través de métodos estadísticos. Así, la hipótesis que se sostiene es que, efectivamente, existe una relación entre estas variables y dicha relación es inversamente proporcional. Formalmente:

H_0 : La madurez BIM no tiene un efecto inversamente proporcional a la desviación en los costos de construcción de un proyecto.

H_1 : La madurez BIM sí tiene un efecto inversamente proporcional a la desviación en los costos de construcción de un proyecto.

Donde H_0 es la hipótesis nula y H_1 la hipótesis alternativa.

Para validar el modelo propuesto en términos estadísticos se debe contar con evidencia para rechazar H_0 . La manera de corroborar dicha información es tomando en cuenta el valor que muestra el p -value. Puesto de otra manera, si $p < 0,05$ existe evidencia para rechazar H_0 ; de lo contrario, si $p > 0,05$, la evidencia en contra de H_0 es débil y no se puede rechazar.

En este caso, y a pesar de lo limitada de la muestra, se tiene que para la submuestra de elementos homogéneos $p > 0,05$, por lo que evidencia para rechazar H_0 es débil.

Por otro lado, al considerar la muestra total se tiene que $p < 0,05$, de manera que se puede rechazar H_0 en favor de H_1 , indicando así que existe evidencia estadística para validar la hipótesis de la relación inversa entre madurez BIM y desviación de costos.

Así, tomando en cuenta el resultado arrojado por la muestra total, el modelo representado en la ecuación (4.23) sería el adecuado para predecir las desviación en costos de cualquier proyecto considerando únicamente su nivel de madurez BIM respecto de un óptimo.

Sin embargo, y a pesar de que si bien el resultado de la muestra total se condice con lo esperado en teoría, ha de tenerse en cuenta que se utilizó una muestra bastante acotada, por lo que se debe tener el cuidado pertinente si se quiere generalizar sobre este resultado. No obstante, el modelo propuesto se comporta de manera bastante apropiada y viene a validar, en términos cuantitativos, aquella *sensación* de ahorro que genera la utilización de la metodología BIM.

Conclusiones

Referencias

- Barlish, K., y Sullivan, K. (2012). How to measure the benefits of BIM — A case study approach. *Automation in construction*, 24, 149–159.
- Chang, C.-Y., y Howard, R. (2014). An economic framework for analyzing the incentive problems in building information modeling systems. En *Proceedings of academy of management annual meeting, philadelphia, usa*.
- Comisión Chilena del Cobre. (2018). Inversión en la minería chilena - cartera de proyectos 2018 - 2027.
- Hansen, B. (2018). *Econometrics*.
- Lu, W., Fung, A., Peng, Y., Liang, C., y Rowlinson, S. (2014). Cost-benefit analysis of Building Information Modeling implementation in building projects through demystification of time-effort distribution curves. *Building and environment*, 82, 317–327.
- Lu, W., Peng, Y., Shen, Q., y Li, H. (2012). Generic model for measuring benefits of BIM as a learning tool in construction tasks. *Journal of Construction Engineering and Management*, 139(2), 195–203.
- National Building Information Model Standard Project Committee. (2019). *What is bim?* Descargado de <https://www.nationalbimstandard.org/faqs#faq1>
- NBS. (2018). *National bim report*.
- Saldías, R. O. L. (2010). Estimación de los beneficios de realizar una coordinación digital de proyectos con tecnologías bim.
- Succar, B. (2010). Building information modelling maturity matrix. En *Handbook of research on building information modeling and construction informatics: Concepts and technologies* (pp. 65–103). IGI Global.
- Verbeek, M. (2004). *A guide to modern econometrics*. John Wiley & Sons.