



Vigilada Mineducación

**IMPLEMENTACIÓN DE LA METODOLOGÍA B.I.M. PARA EL CONTROL DEL  
DISEÑO Y EJECUCIÓN DEL PROYECTO METRO AV. 8o MEDELLÍN**

***“IMPLEMENTATION OF THE B.I.M. METHODOLOGY FOR THE DESIGN AND  
EXECUTION CONTROL OF THE METRO AV 8o MEDELLIN PROJECT”***

**RUBÉN DARÍO ALZATE AGUDELO**

**Trabajo de Grado para optar el título de Magister en Ingeniería**

**Asesor**

**LUIS FERNANDO BOTERO BOTERO**

**UNIVERSIDAD EAFIT**

**Escuela de Ciencias Aplicadas e Ingeniería.**

**Maestría en Ingeniería (Énfasis en Gestión de la Construcción).**

**MEDELLIN**

**2022**

## Tabla de Contenido

AGRADECIMIENTOS Y DEDICATORIA .....	6
RESUMEN.....	7
ABSTRACT .....	8
INTRODUCCIÓN .....	9
1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA .....	11
2. JUSTIFICACIÓN .....	14
3. OBJETIVOS DEL TRABAJO: .....	16
3.1. Objetivo general.....	16
3.2. Objetivos específicos:.....	16
4. METODOLOGÍA DE TRABAJO .....	17
5. MARCO DE REFERENCIA .....	19
5.1. Marco Teórico .....	19
5.1.1. Definición y antecedentes BIM.....	19
5.1.2. Beneficios BIM.....	23
5.1.3. Dimensiones BIM .....	25
5.1.4. EIR (Requerimientos de intercambio de información) BIM.....	27
5.1.4.1. Objetivos y entregables (PEB, modelos y usos BIM).....	27
5.1.4.2. La información en BIM: Estado de Avance de los Modelos (EAIM), Niveles de desarrollo (NDI o LOD) y tipos de información (TDI).....	31
5.1.4.3. Entorno común de datos CDE e interoperabilidad BIM.....	37
5.1.5. Adopción de BIM en el mundo y normativa internacional asociada.....	40
5.1.6. Adopción de BIM en Colombia.....	47
5.1.7. Concepto de Madurez.....	50
5.1.7.1. Nivel de madurez BIM .....	51
5.1.8. Sistemas de Transporte masivo .....	56
5.1.8.1. El BRT (Bus Rapid Transit).....	56
5.1.8.2. El Tranvía.....	57
5.1.8.3. El Metro ligero o liviano o LRT (Light Rapid Transit). .....	59
5.1.8.4. El Metro regional y Tren metropolitano.....	60
5.1.8.5. El Metro urbano.....	61
5.1.8.6. Metro de Medellín .....	65

5.1.8.6.1. Plan Maestro “Confianza en el futuro” .....	68
5.2. Estado del arte .....	71
5.2.1. BIM en sistemas tipo Metro urbano .....	76
5.2.2. BIM en otros proyectos ferroviarios (BIM RAILWAY) .....	85
6. RESULTADOS .....	95
6.1. Diagnóstico del estado de implementación BIM en la Empresa Metro de Medellín a partir de un modelo de madurez. ....	95
6.2. Plan de ejecución BIM (P.E.B) respecto a los alcances de los contratos BIM y usos BIM que se darán en el proyecto .....	106
6.2.1. Proyecto METRO DE LA 8o.....	106
6.2.1.1. Características del proyecto .....	108
6.2.2. Plan de ejecución BIM (P.E.B).....	112
6.3. Requerimientos para el contratista y la interventoría del proyecto para la fase 3 de diseños y construcción del proyecto en cuanto a la implementación del BIM .....	115
6.4. Propuesta de estructura de implementación BIM en la empresa Metro de Medellín. .	118
6.4.1. Etapa 1: INICIO.....	119
6.4.2. Etapa 2: PLANEACIÓN .....	122
6.4.3. Etapa 3: EJECUCIÓN .....	130
6.4.4. Etapa 4: MEDICIÓN Y SEGUIMIENTO .....	137
6.4.5. Etapa 5: RETROALIMENTACIÓN .....	140
7. CONCLUSIONES.....	141
8. BIBLIOGRAFÍA .....	144
9. ANEXOS.....	151
9.1. ANEXO 1-numeral 6.1: Cuestionario herramienta RUTA BIM CAMACOL.....	151
9.2. ANEXO 2-numeral 6.2: Plantillas Plan de ejecución BIM (P.E.B) respecto a los alcances de los contratos BIM y usos BIM que se darán en el proyecto.....	151
9.3. ANEXO 3-numeral 6.3: Requerimientos para el contratista y la interventoría del proyecto para la fase 3 de diseños y construcción del proyecto en cuanto a la implementación del BIM.....	151
9.4. ANEXO 4-numeral 6.4: Flujos BIM proceso Gestión de Proyectos. ....	151

**LISTA DE TABLAS**

Tabla 1. Matriz de implementación de herramientas metodológicas.....	18
Tabla 2. Definiciones BIM.....	21
Tabla 3. Evolución de los sistemas CAD y BIM.....	23
Tabla 4. Dimensiones BIM.....	26
Tabla 5. Otras dimensiones BIM.....	26
Tabla 6. Usos BIM.....	30
Tabla 7. Estados de Avance de Información de los Modelos (EAIM).....	32
Tabla 8. Niveles de Información de los Modelos (NDI).....	35
Tabla 9. Tipos de Información de los Modelos (NDI).....	37
Tabla 10. Relación de guías y normas asociadas a implementación de BIM en el mundo.....	43
Tabla 11. Tiempo de implementación BIM en países vinculados a BIM FORUM LATAM.....	44
Tabla 12. Trayectoria en el uso de BIM por segmento de actuación.....	44
Tabla 13. Trayectoria en el uso de BIM por país.....	45
Tabla 14. Uso de estándares por país.....	46
Tabla 15. Porcentaje de empresas según percepción de beneficios.....	46
Tabla 16. Objetivos de implementación progresiva a 2026.....	48
Tabla 17. Acciones para desarrollar en cuanto a 4 pilares principales de implementación BIM ..	49
Tabla 18. Normas NTC ICONTEC nacionalizadas de la ISO 19650.....	50
Tabla 19. Índice de madurez.....	52
Tabla 20. Niveles de madurez.....	55
Tabla 21. Resumen estadísticas a nivel mundial de la red LRT.....	58
Tabla 22. Top 10 líneas de LTR más largas del mundo en km.....	58
Tabla 23. Características sistemas Metro por continentes.....	62
Tabla 24. Informe a 2020, metros más extensos del mundo.....	63
Tabla 25. Características técnicas y operativas de los sistemas de transporte masivo.....	64
Tabla 26. Líneas Metro de Medellín.....	66
Tabla 27. Número de participantes en tres proyectos de Metro.....	77
Tabla 28. Niveles de madurez RUTA BIM.....	97
Tabla 29. Resultados aplicación cuestionario RUTA BIM CAMACOL.....	98
Tabla 30. Matriz resultados esperados Madurez BIM.....	105
Tabla 31. Estructura plantillas Plan de Ejecución BIM.....	114
Tabla 32. Estructura términos contractuales contratista del proyecto.....	116
Tabla 33. Estructura términos contractuales interventoría del proyecto.....	117
Tabla 34. Etapas para la implementación de la metodología BIM.....	119
Tabla 35. Estructura propuesta para estándar metodológico BIM (componente estrategia).....	131
Tabla 36. Estructura propuesta para estándar metodológico BIM (componente procedimental) .....	132
Tabla 37. Grupos de interés capacitaciones BIM.....	136
Tabla 38. Indicadores de gestión BIM.....	139

**LISTA DE ILUSTRACIONES**

Ilustración 1: Modelo Virtual BIM. ....	24
Ilustración 2: Curva de esfuerzo del proceso constructivo (MACLEAMY) .....	25
Ilustración 3: Niveles de Desarrollo LOD .....	34
Ilustración 4: CDE (Entorno Común de Datos) .....	38
Ilustración 5: Líneas Metro de Medellín .....	67
Ilustración 6: Pilares plan maestro Metro de Medellín.....	69
Ilustración 7: Planes rectores Metro de Medellín .....	70
Ilustración 8: Flujograma proceso de filtrado de búsqueda artículos sobre BIM METRO IMPLEMENTATION.....	74
Ilustración 9: Flujograma proceso de filtrado de búsqueda artículos sobre BIM RAILWAY IMPLEMENTATION.....	75
Ilustración 10: Gráfico resumen nivel de madurez.....	99
Ilustración 11: Render Proyecto Metro de la 8o .....	109
Ilustración 12: Trazado y paradas Proyecto Metro de la 8o .....	110
Ilustración 13: Render Proyecto Metro de la 8o .....	111
Ilustración 14: Organigrama Metro de Medellín (áreas propuestas a impactar con BIM) .....	120
Ilustración 15: Mapa estratégico Metro de Medellín .....	123
Ilustración 16: Línea de tiempo horizonte de implementación BIM.....	126
Ilustración 17: Mapa de macroprocesos Metro de Medellín.....	127
Ilustración 18: Mapa de procesos Metro de Medellín .....	128
Ilustración 19: Proceso Gestión de Proyectos Metro de Medellín .....	134
Ilustración 20: Propuesta diagrama flujos BIM.....	135

## **AGRADECIMIENTOS Y DEDICATORIA**

*Agradecimientos especiales al profesor Luis Fernando Botero Botero por su asesoría, acompañamiento y valiosos aportes en este trabajo.*

*A la Gerencia de Planeación del Metro de Medellín por el apoyo que me brindaron en el tiempo dedicado a la Maestría y a la consecución de este trabajo, en especial a mi compañero y amigo Jeamy Joe Baena Tirado profesional PMO de la Gerencia de Planeación, por sus aportes y experiencias compartidas.*

*Y una dedicatoria muy especial a mi hijo Matías y a mi esposa Juliana por la paciencia y apoyo incondicional que tuvieron conmigo en el tiempo dedicado a este trabajo. A mis padres Carlos y Esther que aún los conservo vivos, a mis hermanas Gloria, Patricia, Mery (fallecida hoy hace 3 años) y al resto de mi familia.*

## RESUMEN

Debido a la complejidad de los proyectos que desarrolla la empresa Metro de Medellín y considerando la adopción de la transformación digital que actualmente se adelanta en el sector arquitectura, ingeniería y construcción, se presenta una propuesta de implementación de metodología BIM para el proyecto metro la 80, como prueba piloto, que permitirá su implementación progresiva en los futuros proyectos que adelante el Metro de Medellín. Como punto de partida se presenta un estado del arte sobre implementación de la metodología BIM en proyectos ferroviarios, posteriormente un diagnóstico al interior de la empresa, que permitió definir los avances y brechas frente a una implementación de BIM, luego un desarrollo de documentos contractuales para el proyecto Metro de la 80 y finalizando con una propuesta estructurada para la implementación de la metodología en próximos proyectos. Los resultados obtenidos dan cuenta de poca referenciación en cuanto a implementaciones de la metodología BIM en proyectos ferroviarios, el nivel de madurez en fase “inicial” como conclusión del autodiagnóstico, la expectativa generada con respecto a los lineamientos contractuales BIM con el que se espera se mejoren los resultados de la gestión de proyectos de la Empresa mediante este proyecto piloto, y finalmente, que la estructura propuesta de implementación de la metodología BIM, sirva de referente para futuros proyectos de la Empresa.

**Palabras claves:** Implementación BIM en proyectos de Metros y ferrocarriles, matriz de madurez BIM, Plan de Ejecución BIM Metro, lineamientos contractuales BIM, Implementación BIM Metro de la 80.

## ABSTRACT

Due to the complexity of the projects developed by the Metro de Medellín company and considering the adoption of the digital transformation that is currently taking place in the architecture, engineering and construction sector, a proposal for the implementation of the BIM methodology is presented for the metro la 80 project, as a pilot test, which will allow its progressive implementation in future projects carried out by the Medellín Metro. As a starting point, a state of the art on the implementation of the BIM methodology in railway projects is presented, then a diagnosis within the company, which allowed defining the advances and gaps in the face of a BIM implementation, then a development of contractual documents for the Metro de la 80 project and ending with a structured proposal for the implementation of the methodology in future projects. The results obtained show little referencing in terms of implementations of the BIM methodology in railway projects, the level of maturity in the "initial" phase as a conclusion of the self-diagnosis, the expectation generated with respect to the BIM contractual guidelines with which it is expected to be improve the results of the Company's project management through this pilot project, and finally, that the proposed structure for the implementation of the BIM methodology serve as a reference for future Company projects.

**Keywords:** BIM implementation in Metro and railway projects, BIM maturity matrix, BIM Execution Plan Metro, BIM contractual guidelines, BIM Implementation of the Metro 80.



## INTRODUCCIÓN

Dadas las complejidades de los proyectos de diseño y construcción de transporte masivo tipo metro, en el que los retrasos y sobrecostos son recurrentes en su desarrollo, tanto estructuradores como los ejecutores de proyectos continúan en la búsqueda de soluciones para conseguir mejores resultados en la gestión de este tipo de proyectos y superar dichas complejidades. En este sentido la empresa Metro de Medellín como gestora del proyecto Metro de la avenida 80, pretende incorporar la metodología BIM, como proyecto piloto en pro de obtener mejores resultados en su gestión.

El presente trabajo de investigación contempla, el estado del arte que muestra diferentes casos de estudio de implementación de BIM en proyectos ferroviarios tipo metro y que dan cuenta de una serie de beneficios consecuentes de adoptar este tipo de soluciones en la mejora de gestión de este tipo de proyectos. Para determinar el estado de avance en la implementación BIM en la empresa Metro de Medellín, se realizó un autodiagnóstico y se utilizó una herramienta para determinar la madurez BIM de la empresa.

Así mismo, en los capítulos siguientes se describen unos requerimientos contractuales orientados, tanto a la elaboración de un Plan de Ejecución BIM por parte del ejecutor del proyecto Metro de la 80, como los lineamientos propuestos a nivel contractual sobre la implementación de la metodología BIM en dicho proyecto para el contratista y la interventoría de dicho proyecto los cuales se presentan como anexos.

Finalmente se describe un capítulo final sobre una propuesta de estructura de implementación BIM en la empresa Metro de Medellín en las fases de inicio, planeación, ejecución, medición y retroalimentación con el horizonte a 2025, para estar alineados con la estrategia de digitalización del sector a partir de la implementación BIM.

## **1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA**

En el desarrollo de proyectos de construcción de sistemas de transporte masivo (tipo Metro), van inmersos una serie de componentes tales como construcción de infraestructura vial, edificaciones, urbanismos, redes de servicios públicos y montajes de equipos electromecánicos, sistemas eléctricos, sistemas de control, operación, comunicaciones, recaudo, entre otros. Para una correcta gestión, se deben controlar una serie de variables por parte de los ejecutores de proyectos y las respectivas supervisiones y/o interventorías contractuales con el fin de alcanzar el cumplimiento del alcance, efectividad en los tiempos de entrega y cumplimiento del presupuesto de los contratos de construcción.

En este sentido, debido a la complejidad de esta clase de proyectos, se presentan una serie de dificultades que conllevan a desaciertos que pueden conducir a una gestión no exitosa por la falta de coordinación e integración de las diferentes áreas de ingeniería y/o especialidades conexas al objeto del contrato, entre otros tópicos, que pueden ocasionar profundos problemas de desfases en los presupuestos y retrasos importantes en los tiempos de ejecución. Frente a lo anterior, las entidades originadoras de los contratos (clientes) inician procesos jurídicos y posteriores aplicaciones de medidas contractuales y/o multas por incumplimientos a contratistas e interventorías por la falta de control.

Aunque las entidades públicas siempre han tenido la intención de planear y estructurar proyectos que cumplan con el alcance, tiempo y costos de los proyectos, en la mayoría de los casos no se han logrado resultados satisfactorios de acuerdo con las premisas con las que realizó la respectiva planeación de este. Se menciona por ejemplo en la investigación “Análisis de la desviación de tiempo y costo en proyectos de infraestructura vial en Colombia” que para el periodo de tiempo 2012-2016, el 40% de los procesos contractuales analizados presentan desviación en

tiempo, el 29% muestran desviación en costo y aproximadamente el 20% presentan retrasos y sobrecostos. Así mismo, se pudo evidenciar que el 20% de los procesos contractuales presentan suspensiones (Cobo Pérez, 2017).

Investigaciones internacionales dan cuenta de ciertos casos de estudio donde se denotan algunos factores determinantes en los retrasos de esta clase de proyectos de infraestructura pública tipo metro que indican problemas o dificultades en su ejecución. Tal es el caso de la construcción del proyecto Metro de Riyath en Arabia Saudita donde de acuerdo con lo mencionado por (Gopang et al., 2020) identificaron un listado de las más representativas, así como otro caso relevante indicado por (Khosravi & Kähkönen, 2015) se refieren a la gestión y planificación bajo las complejidades de la construcción de metros reconociendo aspectos complejos que no se pueden llevar a cabo sin conectar todas las partes interesadas desde el ámbito legal, económico, técnico, socio-ambiental.

Estos casos mencionados, dan cuenta de los problemas y dificultades en retrasos y sobre costos en la construcción de proyectos de transporte. Frente a lo anterior, y de cara a tener la posibilidad de mejorar la gestión de proyectos de este tipo se han implementado nuevas metodologías de trabajo con la adopción de procesos de digitalización en esta industria que han contribuido a la minimización de dichos problemas.

La metodología BIM permite eliminar la fragmentación de los proyectos mediante procesos de digitalización con un enfoque de tipo colaborativo, ha sido implementada con éxito en la industria de la construcción y que está tomando un impulso en Colombia para aportar a la gestión de proyectos.

En ese sentido, para abordar el control técnico de un proyecto como el diseño, planeación, construcción y operación del Metro de la 80 en la ciudad de Medellín, se requiere el tratamiento

de un gran número de variables asociadas a la planeación y ejecución del proyecto, teniendo en cuenta experiencias y lecciones aprendidas en la construcción de otras líneas de metro en el mundo. Por ello surge la pregunta, **¿cómo mejorar la gestión de proyectos en el Metro de Medellín mediante la implementación de la metodología BIM en el Metro de la 8o?**

## 2. JUSTIFICACIÓN

El corredor de la Avenida 80, fue identificado dentro del Plan Maestro del Metro de Medellín como uno de los proyectos de transporte de pasajeros más importantes en los últimos 25 años en la Ciudad luego de la construcción de las líneas A y B. El corredor refiere un trazado desde la estación Caribe (Terminal del Norte) hacia el sector de la facultad de Minas tomando la ruta por la Calle 65 y transversal 73 y tomando posteriormente la Avenida 80-82 hasta el sector de la Aguacatala.

La línea de metro ligero de la Avenida 80 tendrá 13.25 kilómetros de longitud, y cuenta con un total de 17 estaciones.

En el proyecto se han definido tres tramos o fases, asociados a su integración con la línea B del metro y BRT de la Calle 30:

- Tramo/Fase 1: Estación Caribe (Línea A del metro) y estación Floresta (Línea B del metro)
- Tramo/Fase 2: Estación Floresta (Línea B del metro) y la Calle 30 (Líneas 1 y 2 de Metroplús)
- Tramo/Fase 3: Calle 30 (Líneas 1 y 2 de Metroplús) y Estación Aguacatala (Línea A del metro).

Por ello, el Metro de Medellín tendrá un reto sumamente importante en materia de planificación y ejecución de este proyecto el cual beneficiará aproximadamente un millón de Habitantes del occidente de la Ciudad y que luego de la aprobación del documento CONPES 4003, se garantiza la financiación del 70% de proyecto por parte del Gobierno Nacional, al igual que el reciente compromiso por parte de la Alcaldía de Medellín de los 30% de los recursos restantes.

Es ahí donde para su correcta materialización, se requerirá de una implementación juiciosa del control del proyecto mediante la metodología BIM, que permitiría una adecuada inversión de los recursos públicos obtenidos recientemente y así ser referentes en ámbito nacional e internacional en su aplicación para proyectos de este tipo.

Desde el punto de vista académico, se evidencia que no se presentan muchas experiencias de implementación de metodología BIM en construcción de metros toda vez que no son proyectos muy repetitivos tanto por la envergadura como por su costo, por lo que el presente trabajo, pretende aportar en gran medida no solo a resaltar la importancia de llevar muy bien a cabo los procesos de planificación y ejecución sino que servirá de aporte para la mejora de la gestión a partir de la adopción de una metodología de trabajo y procesos de digitalización que beneficiará este proyecto y los posteriores que la empresa Metro de Medellín desarrolle, dejando como precedente la correcta comunicación y trabajo colaborativo de las áreas interesadas para conseguir mejores resultados en la gestión de estos proyectos. Por ello la Empresa es consciente del reto de construir tanto el metro liviano como los futuros proyectos de expansión abordando procesos de digitalización apoyado en la metodología BIM.

Dado el valor e importancia que representa el proyecto por los beneficios y el mejoramiento de la calidad de vida que obtendrán las personas en el área de influencia, la cual generará este sistema de transporte masivo, se hace necesario que el proyecto se planee y se ejecute de la mejor manera, razón por la cual, implementar la metodología BIM en la obra más importante de la ciudad en los últimos 25 años justifica la realización del trabajo.

### **3. OBJETIVOS DEL TRABAJO:**

#### **3.1. Objetivo general**

- Proponer una estructura de implementación de la metodología BIM para el proyecto Metro de la 80 y los futuros proyectos de la Empresa Metro de Medellín, en concordancia con la estrategia de adopción nacional para proyectos públicos a 2026.

#### **3.2. Objetivos específicos:**

- Levantar el estado del arte referente a la implementación de la metodología BIM en proyectos férreos y sistemas de transporte masivo de pasajeros tipo Metro en el mundo desde las fases tempranas de los proyectos hasta su construcción y operación.
- Presentar un diagnóstico del estado de implementación BIM en la Empresa Metro de Medellín a partir de un modelo de madurez.
- Definir el plan de ejecución BIM (P.E.B) respecto a los alcances de los contratos BIM y usos BIM que se darán en el proyecto.
- Definir los requerimientos para el contratista y la interventoría de proyecto para la fase 3 de diseños y construcción del proyecto en cuanto a la implementación del BIM.
- Formular una propuesta de estructura de implementación BIM en la empresa Metro de Medellín en las fases de inicio, planeación, ejecución, medición y retroalimentación con el horizonte a 2025, alineada a la estrategia nacional de implementación de la metodología a 2026 en proyectos públicos.



#### 4. METODOLOGÍA DE TRABAJO

La metodología de la investigación es una ciencia que busca definir una serie de procedimientos de técnicas y principios de manera ordenada con el fin de lograr el cumplimiento de unos objetivos trazados y encaminados a la solución de un problema y/o producir más conocimiento científico. Así mismo, el tipo de investigación científica se puede encauzar de acuerdo con las necesidades particulares del proyecto de investigación.

Para el desarrollo del presente trabajo se establece una investigación de tipo cualitativo, en el que se utiliza la recolección de datos sin medición numérica para descubrir o afinar preguntas de investigación en el proceso de interpretación.

El enfoque cualitativo es la vía para investigar sin mediciones numéricas, tomando descripciones, entrevistas, encuestas, criterios de los investigadores, reconstrucciones los hechos, no teniendo en cuenta como tal la prueba de hipótesis como algo necesario (Cortes & Iglesias León, 2004). Tiene la característica de lo holístico porque analiza en conjunto el modo de ver las cosas sin reducirlos a sus partes integrantes. Además, por su naturaleza el proceso es más dinámico por medio de la interpretación de los hechos, entendiendo las variables que intervienen en el proceso.

Adicionalmente, el presente trabajo se podría enmarcar en un ESTUDIO DE CASO, en el que según lo mencionado por Martínez Carazo (2006) “es una estrategia de investigación científica en cuento a la metodológica, muy útil en el desarrollo de las teorías existentes, obtención de resultados para el fortalecimiento y surgimiento de nuevos paradigmas científicos con el fin de contribuir al desarrollo de un campo científico determinado”. Como estrategia, el investigador de este trabajo adoptó un ESTUDIO DE CASO de una organización (Metro de Medellín) para la implementación de la metodología BIM en un proyecto piloto denominado METRO DE LA 8o de la empresa Metro de Medellín.

Teniendo en cuenta la metodología de investigación definida a aplicar, se presenta a continuación la Matriz de Herramientas Metodológicas Vs los Objetivos Específicos Trazados para este trabajo, que son los que marcan las actividades a desarrollar. En la siguiente tabla se indican las fases por las cuales pasa el proyecto asociadas a dichos objetivos que se cumplen a través de la implementación de varias herramientas metodológicas.

<b>ETAPA ó FASE</b>	<b>OBJETIVO ESPECÍFICO</b>	<b>HERRAMIENTA METODOLÓGICA</b>
Recopilación de Información	Levantar el estado del arte referente a la implementación de la metodología BIM en proyectos férreos y sistemas de transporte masivo de pasajeros tipo Metro en el mundo desde las fases tempranas de los proyectos hasta su construcción. .	Revisión bibliográfica a partir de bases de datos internacionales
Diagnóstico de la implementación BIM de la Empresa Metro de Medellín	Presentar un diagnóstico del estado de implementación BIM en la Empresa Metro de Medellín a partir de un modelo de madurez.	Revisión y análisis de documentos de la Empresa Metro y aplicación de modelo de madurez.
Generación de documentos contractuales BIM	Definir el plan de ejecución BIM (P.E.B) respecto a los alcances de los contratos BIM y usos BIM que se darán en el proyecto.	Estructuración del plan de ejecución BIM (BEP O PEB)
	Definir los requerimientos para el contratista y la interventoría de proyecto para la fase 3 de diseños y construcción del proyecto en cuanto a la implementación del BIM.	Estructuración de documentos contractuales y/o Pliego de condiciones para contratos de diseño, construcción e interventoría.
Propuesta de estructura de Implementación	Formular una propuesta de estructura de implementación BIM en la empresa Metro de Medellín en las fases de inicio, planeación, ejecución, medición y retroalimentación con el horizonte a 2025, alineada a la estrategia nacional de implementación de la metodología a 2026 en proyectos públicos	Estructuración de la propuesta de metodología estándar en BIM para los proyectos Metro. Revisión y análisis de documentos

Tabla 1. Matriz de implementación de herramientas metodológicas

*Fuente: Elaboración propia*

## **5. MARCO DE REFERENCIA**

### **5.1. Marco Teórico**

La complejidad actual de los proyectos ha obligado a la implementación de tecnologías de información y trabajo colaborativo que tiene sus orígenes a partir del desarrollo de los sistemas CAD hasta evolucionar en BIM, por lo cual es importante para el presente trabajo de investigación describir conceptos fundamentales teóricos relacionados con el objeto de estudio tales como conceptos de BIM y sistemas de transporte masivo.

#### **5.1.1. Definición y antecedentes BIM**

El concepto de B.I.M relacionado como Building Information Modeling, consiste en una metodología de trabajo asociada a la evolución de los diseños asistidos por computador CAD (Computer-Aided Design) que busca centralizar toda la información de un proyecto en un modelo digital compartido, para determinar por anticipado las interferencias, generar información y realizar una gestión adecuada frente al cumplimiento del alcance, tiempos de ejecución y control de costos. Esta metodología también se enfoca en disminuir la fragmentación de la información mediante la posibilidad de comunicación y la visibilidad del desarrollo del proyecto y su información por todos los participantes en el proyecto.

A continuación, se presenta una serie de definiciones de varios autores relacionadas con el concepto de BIM mediante la siguiente tabla:

AÑO	AUTOR	DEFINICIÓN
2002	Autodesk	Las soluciones BIM crean y operan en base de datos digitales para la colaboración y gestionan el cambio en ellas para que una modificación en cualquier parte de la base de datos se coordine el cambio en ellas para que una modificación en cualquier parte de la base de datos se coordine en todas las demás partes, capture y conserve la información para su reutilización por aplicaciones adicionales específicas de la industria.
2006	H. Penttilä	Bulding Information Modeling (BIM) es un conjunto de políticas, procesos y tecnologías que interactúan generando una metodología para gestionar el diseño esencial del edificio y los datos del proyecto en formato digital a lo largo del ciclo de vida del edificio.
2008	Lee	Un proceso virtual que abarca todos los aspectos, disciplinas y sistemas de una instalación dentro de un solo modelo virtual, lo que permite a todos los miembros del equipo de diseño colaborar de manera más precisa y eficiente que el uso de procesos tradicionales.
	Eastman, Teicholz, Sacks & Liston	Verbo o frase adjetiva para describir herramientas, procesos y tecnologías facilitadas por documentación digital legible por una máquina, sobre un edificio, su desempeño, su planificación, su construcción y más tarde su operación.
	Coloma	Conjunto de metodologías de trabajo y herramientas caracterizado por el uso de información de forma coordinada, coherente, computable y continua; empleando una o más bases de datos compatibles que contengan toda la información en lo referente al edificio que se pretende diseñar, construir o usar. Esta información puede ser de tipo formal, pero también puede referirse a aspectos como los materiales empleados y sus calidades físicas, los usos de cada espacio, la eficiencia energética de los cerramientos, etc.
2011	Associated General Contractors of America	BIM es una representación rica de los datos de construcción, orientada a objetos, inteligente y parametrizada, a partir de la cual se pueden extraer y analizar las visiones apropiadas y las necesidades de datos de múltiples usuarios para generar información que se puede utilizar para tomar decisiones y mejorar el proceso de entrega del edificio.
	Eastman	BIM no es solo un cambio tecnológico, es también un proceso de cambio que permite que un edificio sea representado por objetos inteligentes que portan información detallada.
2012	Stagg	Método que describe un proyecto y sus espacios, estructuras, componentes y materiales con información esencial y sus propiedades.
2013	Dong, Khanzode & Lindberg	Representación digital de una instalación que ilustra su geometría precisa y datos pertinentes utilizados para respaldar la fabricación del proyecto, trabajos de construcción y adquisiciones.
2014	Eastman, Teicholz, Sacks & Liston	BIM es un proceso colaborativo que representa una estructura empresarial para el trabajo y la comunicación basado en el uso de estándares abiertos de intercambio de información que mejora la calidad y la eficiencia en proyectos.
2015	US National Building Information Modeling Standard NIBS	Building Information Modeling (BIM) es una representación digital de las características físicas y funcionales de una instalación. BIM es un recurso de conocimiento compartido para obtener información sobre una instalación que constituye una base confiable para tomar decisiones durante su ciclo de vida, desde la concepción más temprana hasta la demolición.

AÑO	AUTOR	DEFINICIÓN
2016	National Building Specification NBS (UK)	BIM o Building Information Modeling es un proceso para crear y administrar información sobre un proyecto de construcción a lo largo del ciclo de vida del proyecto.
2017	Succar	Tecnologías, procesos y políticas que permite a las múltiples partes interesadas diseñar, construir y operar colaborativamente un proyecto de manera virtual.
	Smith	Representación digital de las características físicas y funcionales de una edificación.
	U.S. General Services administration (GSA)	BIM es un producto digital inteligente que representa un conjunto de datos estructurados que definen un edificio.
	BIM FORUM CHILE	BIM (Building Information Model) es la representación digital paramétrica del producto de construcción (ejemplos: losas, muros, pilares, equipamiento, puertas, ventanas, etc.) que incluye su geometría e información.  BIM (Building Information Modeling) es una metodología/ proceso para desarrollar y utilizar modelos BIM para apoyar decisiones de diseño, construcción y operación durante todo el ciclo de vida de un proyecto, lo que implica una integración y gestión de información provista y usada por diferentes actores del proyecto.
2018	Borrmann, A., Beetz, J., Koch, C	BIM es una representación digital integral de una construcción con gran profundidad de información que incluye la geometría tridimensional de los componentes del edificio a un nivel de detalle definido. Además, también comprende objetos no físicos, como espacios y zonas, un proyecto jerárquico estructura u horarios. Los objetos generalmente están asociados con un conjunto bien definido de información como el tipo de componente, materiales, propiedades técnicas, o costos, así como las relaciones entre los componentes y otros elementos físicos o (BIM) entidades lógicas. El término modelado de información de construcción en consecuencia describe tanto el proceso de creación de tales modelos digitales de construcción como el proceso de mantenerlos, usarlos e intercambiarlos a lo largo de toda vida útil de la instalación construida.
2019	Autodesk	Building Information Modeling (BIM) es un proceso inteligente basado en modelos 3D que brinda a los profesionales de arquitectura, ingeniería y construcción (AEC) la información y las herramientas para planificar, diseñar, construir y administrar edificios e infraestructura de manera más eficiente.

Tabla 2. Definiciones BIM

*Fuente: Tomado de (Botero Botero, 2021)*

Hay una historia que precede a la implementación del BIM, por lo que en la siguiente tabla se relacionan los antecedentes para comprender los sistemas que refieren a su concepto:

AÑO	Antecedentes BIM
1957 – 1970	Se presentaron los primeros desarrollos del CAD (Computer-Aided Design), con Patrick J. Hanratty como tecnología de control numérico), Christopher Alexander con programación de objetos y Hanratty con gráficos generados a partir de ordenador con desarrolló del DAC (Diseño asistido por computador),
1975-1977	El profesor Charles Eastman publica un artículo desarrollando el BDS (Building description System), con ideas sobre diseño paramétrico y representaciones 3D con una base de datos integrada que permitía análisis de visualizaciones). Además, crea el GLIDE (Graphical Language for Interactive Design) exhibiendo características de plataforma BIM
1985	En Estados Unidos, Diehl Graphsoft desarrolló Vectorworks, como uno de los primeros referentes de software CAD y modelado 3D y con capacidades de multiplataforma BIM.
1986	Se implementa RUCAPS como primer programa CAD en la historia y precursor del BIM en el proyecto de renovación de la Terminal 3 del aeropuerto de Heathrow en Londres.
1987	Se lanzó el software ArchiCAD, convirtiéndose en el primer software BIM para un ordenador personal.
1988	La empresa PTC crea el programa Pro/ENGINEER, como uno de los primeros aplicativos de modelado paramétrico y diseño electromecánico.
1993	Lawrence Berkeley National Lab lanza el Building Design Advisor, para realizar simulaciones basadas en un modelo BIM.
1995	La empresa Autodesk desarrolló un formato con el que los datos fueran compatibles con diferentes softwares BIM de archivo denominado IFC (Industry Foundation Class)
1997	ArchiCAD propone el primer referente basado en el intercambio de archivos por medio de entornos colaborativos.
1999	Se crea un sistema de planificación de BIM basado en bases de datos denominado Onuma Molder Server por medio de trabajo colaborativo a través de internet.
2000	Se desarrolla un programa denominado REVIT (Revise Instantly) por Irwin Jungreis y Leonid Raiz, con el que se revoluciona el BIM a través de una plataforma con programación orientada a objetos con utilidad de cambio paramétrico.
2001	Se desarrolla el software JetStream, de Navisworks sobre revisión 3D por medio de un conjunto de herramientas para colaboración y navegación y coordinación CAD permitiendo detección de problemas por medio de chequeos de simulaciones.
2002-2007	Finlandia crea el proyecto integrado BIM (2002), además las guías (Senate Properties) (GSA) de Estados Unidos y Finlandia en 2007 para llevar a cabo un proyecto BIM. La empresa Autodesk adquiere los programas BIM Revit en 2002 y Navisworks en 2007.
2010	Se anuncia en el gobierno de Reino Unido los primeros requisitos para la implantación de los modelos BIM.
2012	Se desarrolla Formit por medio de Autodesk para modelos BIM en un dispositivo móvil).

AÑO	Antecedentes BIM
2012	Se publica en Finlandia la primera referencia de requerimientos BIM.
2015	Se adoptan hojas de ruta para la implantación de modelos BIM en varios países europeos entre ellos Italia, Francia y España.
2016	El gobierno del Reino Unido se hace obligatorio en los proyectos públicas la implantación de la metodología BIM.
2017	Se crea BIM Forum Colombia
2018	Se hace obligatorio el uso de BIM en para proyectos de licitaciones públicas de edificación en algunas regiones España.
2018	Colombia ingresa a la red de gobiernos latinoamericanos conformada por países como Costa Rica, Colombia, Perú, Brasil, Uruguay, Chile, México y Argentina, bajo la iniciativa BIM Gob Latam.
2020-2026	Estrategia de implementación BIM en Colombia con el apoyo del gobierno nacional y la obligatoriedad de desarrollar proyectos públicos utilizando esta metodología a partir de 2026.

Tabla 3. Evolución de los sistemas CAD y BIM.

Fuente: Elaboración propia a partir de (Timetoast, 2021)

### 5.1.2. Beneficios BIM

La implementación de la metodología BIM en los proyectos de construcción ofrece una serie de soluciones en beneficio de los procesos de ejecución, las cuales van encaminadas a la correcta gestión desde la fase del diseño, manejo de documentación del contrato y especificaciones, control de cronogramas y presupuestos mediante un modelo virtual integrado en el que convergen los diferentes interesados, diseñadores, constructores y cliente tal y como se puede apreciar en la siguiente imagen:

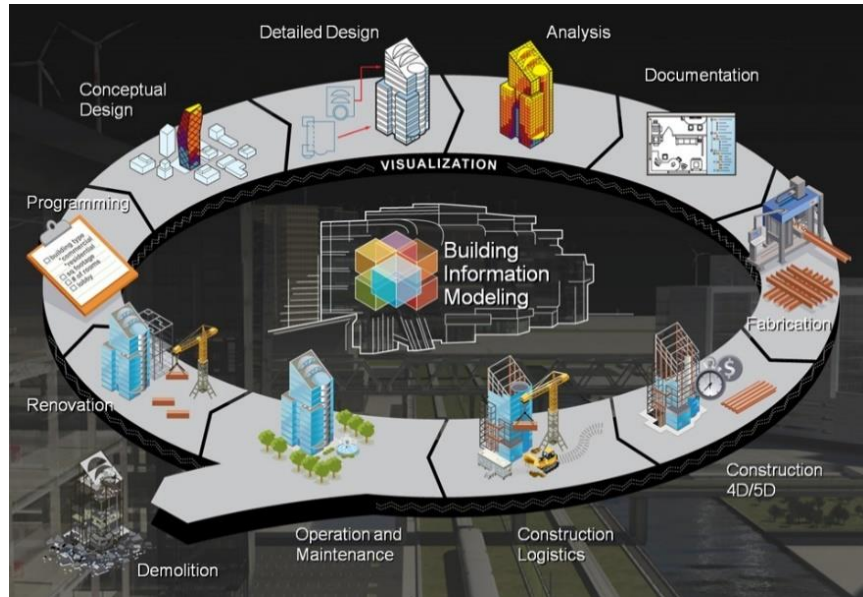


Ilustración 1: Modelo Virtual BIM.

Tomado de (KAIZEN Arquitectura & Ingeniería, 2021)

Con respecto a las metodologías tradicionales, BIM es determinante en evitar la pérdida de información en el ciclo de vida de un activo; en este proceso BIM se conserva una tendencia de crecimiento en el valor de la información con respecto a la pérdida de esta en los procesos tradicionales, para esto se define un cambio en el aspecto de toma de decisiones con el fin de que sean tomadas en fases tempranas donde la capacidad de influir positivamente en el costo final de un proyecto es muy alta frente al costo de ejecutar una acción que es muy bajo (Soler Severino et al., 2014). Esta referencia se puede visualizar en la Curva de MacLeamy, debido a la difusión que le dio su autor:



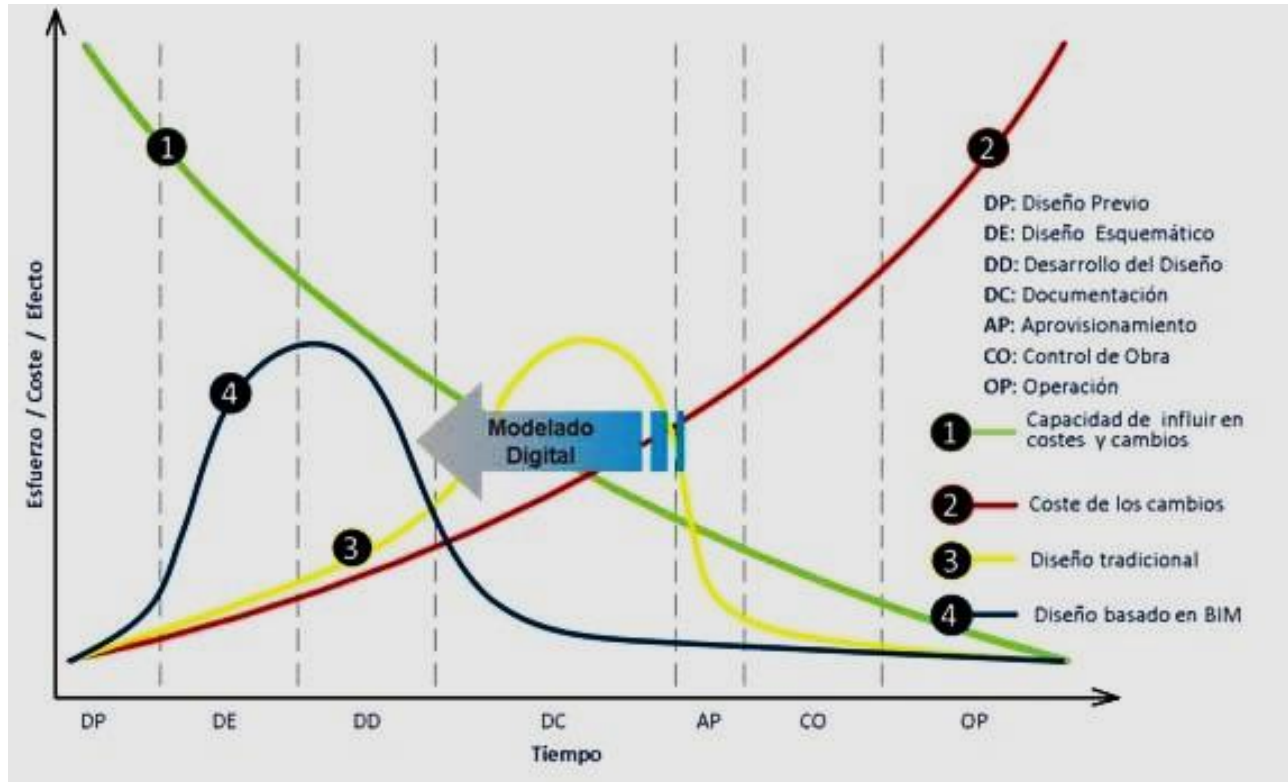


Ilustración 2: Curva de esfuerzo del proceso constructivo (MACLEAMY)

Tomado de (Soler Severino et al., 2014)

De acuerdo con la gráfica anterior, se puede apreciar claramente que si bien, se requieren esfuerzos iniciales en la primera fase de diseño del proyecto con BIM, se nota una reducción eficiente hasta las etapas finales, a diferencia de los impactos producidos y altos costos al final del proyecto cuando se lleva a cabo una implementación con metodologías tradicionales.

### 5.1.3. Dimensiones BIM

Las dimensiones BIM relacionan con los usos y se determinan según el avance del modelado del proyecto. A medida que se adicionan nuevos parámetros a los modelos surgen

nuevas dimensiones para la modelación. Un modelo 3D (tridimensional) contiene propiedades geométricas del proyecto, la dimensión 4D incluye el cronograma de la obra (variable tiempo), la 5D considera el costo del proyecto, la dimensión 6D refiere a la sostenibilidad (ventilación, eficiencias energéticas y térmicas) y la dimensión 7D corresponde a la etapa de operación y mantenimiento (Mojica & Valencia, 2012).

DIMENSIÓN	ELEMENTO CARACTERÍSTICO	ELEMENTOS ASOCIADOS
2D	Documentación	Esquemas y planos
3D	Propiedades tridimensionales	Visualización de elementos
4D	Cronograma	Cronograma de obra
5D	Costo	Informe de presupuestos
6D	Sostenibilidad	Análisis de ventilación, iluminación, eficiencia energética, ventilación, iluminación
7D	Operación y mantenimiento	Logística, manejo de proveedores, Gestión de activos, contratación, compras.

Tabla 4. Dimensiones BIM

Elaboración propia a partir de (Mojica & Valencia, 2012)

Otras dimensiones adicionales a las anteriores han surgido a partir del notorio avance de la transformación digital y de la maduración de BIM. Estos casos hacen referencia a las dimensiones 8D,9D y 10D, la cuales estarán direccionadas mediante estos aspectos:

DIMENSIÓN	ELEMENTO CARACTERÍSTICO
8D	Dirigida a los aspectos de Seguridad y Salud en el Trabajo
9D	Comprende la optimización al detalle de los procesos de construcción y sus ahorros en costos (LEAN Construction)
10D	Se denota para procesos de industrialización y automatización de un proyecto (optimización de activos)

Tabla 5. Otras dimensiones BIM

Elaboración propia

#### **5.1.4. EIR (Requerimientos de intercambio de información) BIM**

Para definir todos los requisitos relacionados con el intercambio de información de un proceso BIM se cuenta con el documento EIR (Exchange Information Requirements) el cual es elaborado por el cliente y que define las características de gestión del proyecto que se requiera, delineando el proceso de producción y entrega (BibLus, 2021)

También se puede denominar como SDI o Solicitud de Información, que básicamente se puede entender como un documento que indica el por qué y para qué se implementará BIM en un proyecto. Este debe indicar de manera explícita y formal los entregables BIM y la información contenida en ellos, además, debe ser generado por el solicitante y entregado a los oferentes o proveedores que pueden ser internos o externos, por ejemplo, equipos internos encargados de ciertas tareas del proyecto o consultores (contratistas) en el marco de una licitación (Soto et al., 2019).

Entre los más aspectos mínimos que puede contener una SDI se pueden relacionar los siguientes:

##### **5.1.4.1. Objetivos y entregables (PEB, modelos y usos BIM)**

Es necesario que se establezcan inicialmente unos objetivos para una adecuada implementación de la metodología BIM. Un objetivo general enmarcado en una meta principal la que se pretende obtener a través de su uso para un proyecto determinado y unos específicos como tareas particulares que se puedan medir y relacionadas con problemas a solucionar previamente detectados. Deben tener una relación con el objetivo general (Soto et al., 2019).

Entre los entregables a destacar según los requerimientos inicialmente establecidos en el EIR o SDI es el Plan de Ejecución BIM (PEB) o BIM Execution Plan (BEP) el cual refiere a un documento en el que se definen las reglas y normas internas de un proyecto en el que se va a adoptar la metodología BIM, con el fin de que los actores implicados hagan un trabajo coherente y coordinado (Espacio BIM, 2018).

Así, al inicio de un proyecto, el BIM Manager como persona encargada de liderar la estrategia de implementación de BIM a mediano y largo plazo, responsable de realizar la coordinación de los equipos que participan en el proyecto y con capacidades en gestión de proyectos, estandarización de procesos, modelación básica y avanzada (Soto et al., 2019), debe redactar un PEB de acuerdo con el EIR (Requisitos de Intercambio de Información), al que se incorporen contractualmente todos los actores implicados (cliente, constructor). El BIM Manager tiene la tarea mantenerlo actualizado en las distintas fases del proyecto (Espacio BIM, 2018).

También se puede referir como una respuesta a los requisitos de información de intercambio y se entrega como entrada en línea o como un documento compilado a la parte designadora. Hay dos versiones complementarias de BEP: BEP de 'pre-designación' propuesto por cada posible equipo de ejecución durante el proceso de licitación; y BEP 'posterior a la cita' entregado por el equipo de entrega seleccionando aspectos de la cita serán llevados a cabo por el equipo de entrega (BIMe Initiative, 2021).

La estructura del PEB deberá contener información básica del proyecto, objetivos, usos y competencias del equipo, empresas participantes con sus roles, entregables, estrategia de colaboración y estándares con sus respectivas convenciones asociadas (Soto et al., 2019).

En estos entregables también se relacionan los modelos que refieren a “una representación digital tridimensional (3D) basada en entidades, rica en datos, creada por un actor del proyecto

utilizando una herramienta de software BIM” (BIME Initiative, 2021). Un modelo BIM puede generarse y/o gestionarse durante cualquier etapa de ciclo de vida (Soto et al., 2019) y que es necesario adicionalmente relacionar unos documentos de apoyo al desarrollo tanto previamente como posterior al modelado.

Los usos BIM, son métodos de aplicación durante el ciclo de vida de un activo, para alcanzar uno o más objetivos. Estos van asociados a unos objetivos BIM, los cuales apuntan a solucionar problemas donde se identifique que realmente la metodología aporte valor.

A continuación, se relacionan 25 recomendados por parte de la Universidad de Pensilvania (EU) Penn State para implementar a lo largo de las etapas planificación, diseño, construcción y operación del proyecto. Estos deben corresponder a las necesidades del proyecto, por lo que no se requiere que tengan que ser utilizados en su totalidad.

PLANIFICACIÓN	DISEÑO	CONSTRUCCIÓN	OPERACIÓN
1. Levantamiento de condiciones existentes			
2. Estimación de cantidades y costos			
3. Planificación de fases			
4. Análisis del cumplimiento del programa espacial (zonificación)			
5. Análisis de ubicación			
6. Coordinación 3D			
7. Diseño de especialidades			
8. Revisión de diseño			
9. Análisis estructural			
10. Análisis lumínico			
11. Análisis energético			
12. Análisis mecánico			
13. Otros análisis de ingeniería			
14. Evaluación de sustentabilidad			
15. Validación normativa			
		16. Planificación de obra	
		17. Diseño sistemas constructivos	
		18. Fabricación Digital	
		19. Control de obra	
		20. Modelación as-Built	
		21. Gestión de activos	
		22. Análisis de sistemas	
		23. Mantenimiento preventivo	
		24. Gestión y seguimiento de espacios	
		25. Plan. y gestión de emergencias	

Tabla 6. Usos BIM

Elaboración propia tomada de (Soto et al., 2019) PENN STATE (PennState, 2011)

### 5.1.4.2. La información en BIM: Estado de Avance de los Modelos (EAIM), Niveles de desarrollo (NDI o LOD) y tipos de información (TDI).

El manejo de la información en la metodología BIM refiere a un conocimiento importante sobre cuándo se debe entregar la información de acuerdo con las etapas del proyecto, las fases consecutivas para la definición de datos en los modelos, qué tipo de información y cómo se debe entregar.

Por ejemplo, el EAIM especifica las diferentes fases consecutivas de los datos contenidos en los modelos BIM, que están relacionados directamente con el progreso en el tiempo del proyecto. En la siguiente tabla se puede apreciar los diferentes estados de avance de información de los modelos:

FASES DE INFORMACIÓN	REFERENCIA	DEFINICIÓN
INFORMACIÓN DE DISEÑO	DC: Diseño Conceptual	Fase inicial del proceso de diseño, en la cual, a partir de las especificaciones, requisitos y necesidades del Solicitante, se establece el conjunto de tareas necesarias para obtener una solución al problema planteado.
	DA: Diseño de Anteproyecto	Fase temprana del proceso de diseño, en la que se establecen los criterios generales de un proyecto, considerando los requerimientos y restricciones del Solicitante, tales como normativos y legales.
	DB: Diseño Básico	Fase en la que se preparan los criterios y especificaciones generales de los sistemas que considera el proyecto.
	DD: Diseño de Detalle	Fase en la que se elabora la documentación específica de cada elemento del proyecto, mediante una descripción completa de la información necesaria para la fabricación y/o construcción de éstos.
INFORMACIÓN DE CONSTRUCCIÓN	CC: Coordinación de Construcción	Fase en la que se planifica el conjunto de actividades a ejecutar de un trabajo de construcción, ordenándolo de la manera más eficiente posible y planificando todas las acciones para su ejecución.

FASES DE INFORMACIÓN	REFERENCIA	DEFINICIÓN
INFORMACIÓN DE CONSTRUCCIÓN	CM: Construcción, Manufactura y Montaje	Fase de ejecución de las actividades planificadas en el terreno o fuera de él (off-site), que da inicio a las tareas de fabricación, tanto manuales como industrializadas.
	AB: As-Built	Fase en la que se registra el proyecto tal como se ha construido realmente en el lugar, incluyendo los cambios de diseño ocurridos en el curso del trabajo. En esta fase se realiza la entrega de la información de la construcción, concluyendo el contrato de ésta.
INFORMACIÓN DE OPERACIÓN	PM: Puesta en Marcha	Fase en la que se llevan a cabo las actividades de traspaso del activo al cliente, incluyendo también la información para el uso de ésta como por ejemplo, las garantías de los equipos instalados. Esta información sirve también para el desarrollo de eventuales proyectos de remodelación o ampliación. Esta fase considera las pruebas de funcionamiento del activo.
	GM: Gestión y Mantenimiento del Activo	Fase en la que se ejecutan las tareas de mantenimiento de acuerdo al programa de servicios del activo. Esto incluye las actividades enumeradas en la estrategia de traspaso, la evaluación posterior a la ocupación y la revisión de desempeño del proyecto.

Tabla 7. Estados de Avance de Información de los Modelos (EAIM)

Fuente: Elaboración propia a partir de (Soto et al., 2019)

El Nivel de Desarrollo – (Level of Development, LOD), “define el nivel de desarrollo o madurez de información que posee un elemento del modelo BIM, como puede ser la parte de un componente, sistema constructivo o montaje del edificio o infraestructura” (Tejedo Cerrato, 2021). Estos niveles de información establecen hasta qué punto se puede obtener su fiabilidad en cuanto a variables como la geometría y toda la información que se relaciona con cada elemento. Para la comprensión del término LOD, es imprescindible no confundir el Nivel de Desarrollo con el Nivel



de Detalle; cuando se habla de Nivel de Detalle, se hace referencia únicamente al aspecto gráfico del modelo, es decir, la cantidad de información gráfica que se encuentre.

A continuación, se presenta una descripción de los niveles de desarrollo recomendados en las especificaciones de desarrollo LOD BIM Forum de Estados Unidos (Bedrick et al., 2020)

- LOD 100: El elemento del modelo puede ser representado gráficamente con un símbolo u otra representación de tipo genérico, pero no alcanza a cumplir con los requisitos para ser catalogado como LOD 200.
- LOD 200: El elemento del modelo puede ser representado gráficamente como un objeto o sistema genérico con cantidades, forma, ubicación, tamaño y orientación aproximados. También es posible incorporar información no gráfica al elemento del modelo.
- LOD 300: El elemento del modelo puede ser representado gráficamente como un ensamblaje específico en términos de cantidad, forma, ubicación, tamaño y orientación. También se puede adjuntar información no gráfica al elemento del modelo.
- LOD 350: El elemento del modelo puede ser representado gráficamente como un ensamblaje específico en términos de cantidad, forma, ubicación, tamaño y orientación con otros sistemas de construcción e interfases. También se puede adjuntar información no gráfica al elemento del modelo.
- LOD 400: El elemento del modelo puede ser representado gráficamente como un ensamblaje específico en términos de cantidad, forma, ubicación, tamaño y orientación con información más detallada de fabricación, ensamblaje e instalación. También se puede adjuntar información no gráfica al elemento del modelo.
- LOD 500: El elemento del modelo es una representación verificada en campo (As Built) en términos de cantidad, forma, ubicación, tamaño y orientación. Ya no se presenta

progresión a nivel geométrico pero si a nivel de información. También se puede adjuntar información no gráfica a los elementos del modelo.

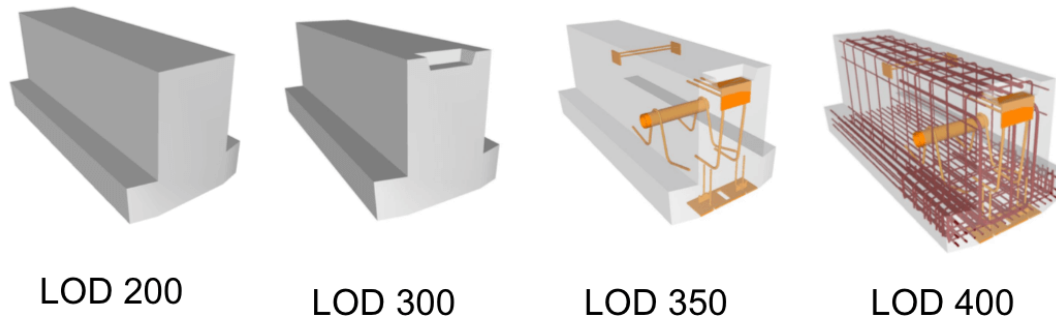


Ilustración 3: Niveles de Desarrollo LOD

Tomado de (MundoBIM, 2017)

Un ejemplo de equivalencia de los LOD son los Niveles de Información o NDI propuestos en el Estándar BIM para proyectos públicos de Chile, los cuales son definidos como grados de profundidad con información tanto geométrica como no geométrica que se encuentra contenida en las entidades de los modelos BIM, según el Estado de Avance de la Información de los modelos a que haya lugar (Soto et al., 2019) y que se presentan en la siguiente tabla:

DENOMINACIÓN	Equivalencia LOD	REFERENCIA	DEFINICIÓN
NDI-1	LOD 100	Información inicial general	Información inicial, que puede ser estimativa, acerca de área, altura, volumen, localización y orientación de los elementos generales.
NDI-2	LOD 200	Información básica aproximada	Información básica del tamaño, forma, localización, cantidad y orientación de los sistemas y elementos generales y su ensamblaje.

DENOMINACIÓN	Equivalencia LOD	REFERENCIA	DEFINICIÓN
NDI-3	LOD 300	Información detallada	Información detallada del tamaño, forma, localización, cantidad y orientación que sea relevante para el montaje de los elementos.
NDI-4	LOD 350	Información detallada y coordinada	Información detallada y coordinada respecto del tamaño, forma, localización, cantidad, orientación e interacción entre los sistemas de construcción y sus elementos de montaje específico.
NDI-5	LOD 400	Información detallada de la fabricación y montaje	Información detallada de la fabricación y montaje, considerando el tamaño, localización, cantidad, orientación e interacción entre los elementos.
NDI-6	LOD 500	Información detallada de lo construido y su puesta en marcha	Información detallada del tamaño, forma, localización, cantidad, orientación y de la puesta en marcha de los elementos construidos.

Tabla 8. Niveles de Información de los Modelos (NDI)

Fuente: Elaboración propia, tomado de (Soto et al., 2019)

Los TDI a su vez hacen referencia a qué información se requerirá en BIM, en cuanto a la materialidad, capacidad, área, volumen, entre otros. Estos datos están organizados según la utilización que se le puede dar a la información durante el ciclo de vida del proyecto. Mediante el siguiente esquema, se puede apreciar los 15 grupos de TDI recomendados en el Estándar BIM para proyectos públicos de Chile.

DENOMINACIÓN	REFERENCIA	DEFINICIÓN
TDI_A	Información general del proyecto	Información básica de identificación del proyecto como el tipo de edificio o infraestructura, nombre del proyecto, dirección, requerimientos espaciales y programáticos, entre otros.
TDI_B	Propiedades físicas y geométricas	Información de las características y propiedades físicas de las entidades tales como anchos, largos, altos, área, volumen, masa, etc.

DENOMINACIÓN	REFERENCIA	DEFINICIÓN
TDI_C	Propiedades geográficas y de localización espacial	Información de las propiedades de ubicación espacial y geográficas de las entidades, de piso, el número y nombre del espacio o zona y otra información necesaria para el posicionamiento de las entidades.
TDI_D	Requerimientos específicos de información para el fabricante y/o constructor	Información específica para la fabricación y/o construcción, como el tipo de elemento (muro, pilar, puerta, etc.), su materialidad, nombre de sus componentes - en caso de existir-, identificación del producto, entre otros.
TDI_E	Especificaciones técnicas	Información de la especificación técnica de la entidad, como peso de transporte, nivel de ruido, etc. En general, aplica para cualquier elemento que sea fabricado industrialmente como, por ejemplo, equipos de aire, mobiliario, entre otros.
TDI_F	Requerimientos y estimación de costos	Información básica para la estimación del costo total del activo, como, por ejemplo, el costo unitario referencial, costo base de ensamblaje, costo de transporte, entre otros.
TDI_G	Requerimientos energéticos	Información de características energéticas de las entidades, como requerimientos de humedad, valor U, consumo de servicios, low E glazing, entre otros.
TDI_H	Estándar sostenible	Información sobre condiciones de sustentabilidad, requerimientos de calidad de iluminación, especificaciones de materiales sustentables y contenido reciclado, entre otros.
TDI_I	Condiciones del sitio y medioambientales	Es información de las características generales del sitio y su entorno tales como, condiciones sísmicas, uso del terreno, de suelo y niveles de riesgo a las personas, entre otras.
TDI_J	Validación de cumplimiento de programa	Información clave para realizar una validación del cumplimiento del programa funcional del proyecto, como áreas planificadas, requisitos de áreas vidriadas, volumetría espacial y servicios requeridos, entre otros.
TDI_K	Cumplimiento normativo	Información que permita revisar el cumplimiento normativo y los requerimientos de seguridad de los ocupantes del proyecto, como requerimientos de control de fuego, requerimientos de ventilación, anchos de accesos, carga de uso y carga de ocupación, así como también aspectos seguridad vial, diseño geométrico de vías, entre otros.
TDI_L	Requerimientos de fases, secuencia de tiempo y calendarización	Información que permita revisar fases, secuencias de tiempo y calendarización de áreas o partes de un proyecto, como, fases contempladas, orden de hitos del proyecto y orden de construcción, entre otros.
TDI_M	Logística y secuencia de construcción	Información clave para revisar la logística de la construcción y su secuencia, como, por ejemplo, ID del material e ID de instalación, número de serie del componente instalado, entre otros.

DENOMINACIÓN	REFERENCIA	DEFINICIÓN
TDI_N	Entrega para la operación	Información clave para apoyar el funcionamiento de la entrega de la construcción como, por ejemplo, nombre de las empresas o compañías participantes del proyecto, sus contactos, nombre de la disciplina y áreas de trabajo, entre otras.
TDI_O	Gestión de activos	Información para la gestión del activo como, tipos de productos, tipos de repuestos, fechas de inicio y fin de garantías, entre otros.

Tabla 9. Tipos de Información de los Modelos (NDI)

Fuente: Elaboración propia, tomado de (Soto et al., 2019)

#### 5.1.4.3. Entorno común de datos CDE e interoperabilidad BIM

En cuanto al entorno común de datos, por sus siglas en inglés (Common Data Environment), es el lugar donde se almacena toda la información relativa a un proyecto BIM y a la que pueden acceder todos los implicados en él (Tejedo Cerrato, 2021). Se puede concebir también como una plataforma tecnológica que provee flujo de trabajo basado en estados.

Un CDE puede contener las siguientes características:

- Archivos con identificación única, compuesta de campos fraccionados por un delimitador.
- Asignar a cada campo un valor con arreglo a una norma de codificación conciliada y documentada.
- Tener atributos a cada archivo: Estado, Revisión.
- Registrar la fecha y el nombre de usuario cuando se cambie el estado.
- Control del acceso a la información.
- Pueden ser distribuidos, no necesariamente únicos.

También puede definirse como una tecnología basada en servidor o en la nube con gestión de bases de datos, transmisión, seguimiento de problemas y capacidades relacionadas que respaldan el flujo de trabajo (BIME Initiative, 2021)

En la siguiente imagen, se puede apreciar la interacción en el intercambio de información que incluye una colección de software BIM, interoperabilidad y formatos IFC.

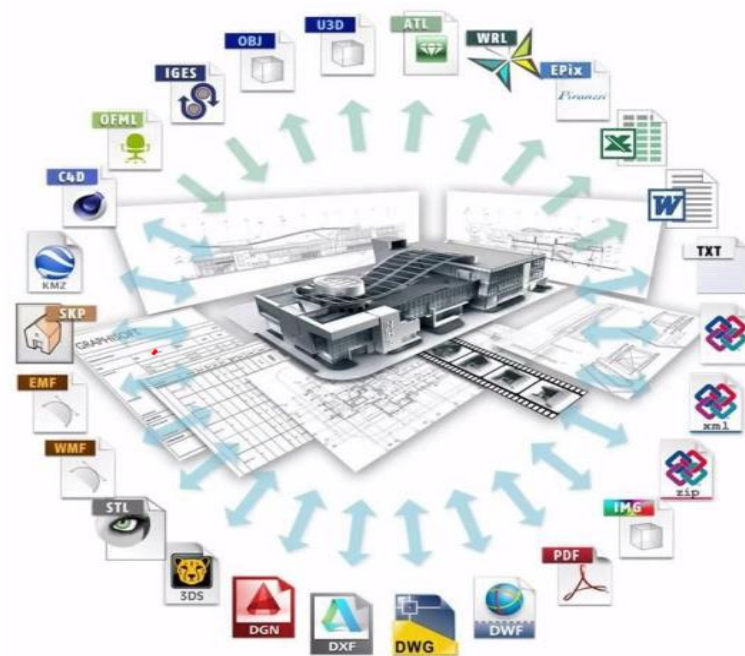


Ilustración 4: CDE (Entorno Común de Datos)

Tomado de: (Díaz D, 2022)

Con respecto a la interoperabilidad, se describe como un entorno de trabajo que debe tener la capacidad de realizar un intercambio de datos entre software BIM sin restricciones de acceso. Se considera importante la interoperabilidad por los siguientes motivos:

- Trabajar con todos independientes del software

- Usar la mejor herramienta de trabajo
- Asegura la mejor disponibilidad de la información a futuro
- Permite la trazabilidad de la información
- Integra BIM con otros datos, procesos y sistemas.

En temas de interoperabilidad, Building Smart es la organización encargada de soportar, promover y difundir la alianza de la interoperabilidad. Para ello, el formato neutro y estándar ISO IFC (Industry Foundation Classes) es el más utilizado y fue desarrollado en conjunto con Autodesk en 1995 y la versión más vigente es el IFC4.3 (2022) (Building Smart International, 2019) es la última versión con aplicación a proyectos lineales (vías, puentes y proyectos férreos) (BIM Corner, 2022).

El término OpenBIM se refiere a un proceso para gestionar y crear modelos con un equipo multidisciplinar basados en formatos abiertos como (IFC, COBie, BCF, gbXML CityGML) independientes del fabricante del software por lo que amplía los conceptos de BIM por medio de un lenguaje común compuesto por procesos definidos y estándares internacionales para garantizar una ventaja para todos los actores del sector de la construcción (Architecture, Engineering, Construction AEC). (ACCA software, 2022).

También es un proceso independiente del proveedor, que admite una colaboración fluida para todos los participantes del proyecto por medio de información de proyecto compartible. facilita también la interoperabilidad en beneficio de proyectos y activos a lo largo de su ciclo de vida (BuildingSMART, 2020)

Este concepto también puede referirse también a la capacidad para trabajar juntos sin problemas sin pérdida de datos y sin un esfuerzo especial en cuanto a sistemas, procesos, formatos de archivo, etc. (BIMe Initiative, 2021)

También hay una clara diferencia con los archivos Closed BIM (BIM cerrado), el cual es un enfoque de trabajo relacionado con el uso de formatos producidos por un software de BIM en particular. Por ello es necesario que para que todos los profesionales del proyecto lo utilicen haya un acuerdo en cuanto a escoger un único software BIM (BibLus, 2021)

#### **5.1.5. Adopción de BIM en el mundo y normativa internacional asociada.**

Diferentes países han tomado la iniciativa para la implementación de la metodología BIM. Estados Unidos, Finlandia y el Reino Unido, se pueden considerar como los artífices en la adopción de guías al interior de sus gobiernos desde los inicios de la década del año 2000. Otros países en el mundo han adoptado igualmente la implementación BIM para sus proyectos, especialmente en el ámbito público, con carácter de obligatorio.

A continuación, se presenta una relación de guías y normas asociadas a implementación de BIM en diferentes países del mundo.

<b>DOCUMENTO</b>	<b>ENTIDAD</b>	<b>OBJETIVO</b>
National BIM Standard U.S. (Iniciativa del National Institute of Building Science)	NBS /Estados Unidos / 2015	El enfoque principal de NBIMS-US™ es proporcionar estándares para facilitar la gestión eficiente del ciclo de vida del entorno construido respaldado por la tecnología digital. Esto se logra mediante la prescripción de elementos y mecanismos efectivos y repetibles en la creación, el intercambio y la gestión de datos de modelado de información de construcción
Building Information Modeling Guide	GSA /Estados Unidos /2003	Es un texto introductorio que sirve como base y punto de partida común para admitir la tecnología BIM en general y aplicaciones BIM individuales en específico



DOCUMENTO	ENTIDAD	OBJETIVO
Guía inicial para implementar BIM en las organizaciones	BIM FORUM CHILE / Chile /	Documento inicial para crear un estándar BIM a nivel nacional
Estándar BIM para proyectos públicos en Chile	CORFO CHILE /Chile/2019	Busca generar un requerimiento de BIM desde el Estado que sea consistente y transversal, es decir, que todas las instituciones públicas que exijan BIM lo hagan de una manera estandarizada y conocida por todos los actores involucrados en el proyecto. Su objetivo es facilitar la implementación de BIM tanto para las empresas privadas como las instituciones públicas.
COBIE (Construction Operations Building information exchange)	Army Corps of Engineers de Estados Unidos/Estados Unidos/	Define las expectativas para el intercambio de información a lo largo del ciclo de vida de una edificación o infraestructura. El uso de COBie garantiza que la información se pueda preparar y utilizar sin la necesidad de conocer las aplicaciones o bases de datos de envío y recepción. Asegura que el intercambio de información pueda ser revisado y validado para su cumplimiento, continuidad e integridad.
AEC (UK) BIM Protocol	AEC UK /Reino Unido/2012	Enfocado principalmente en la adaptación de estándares (BIM Standard for Revit y Bentley Building) para una práctica y eficiente aplicación de BIM, particularmente en las etapas de diseño de un proyecto
AUTRALIAN AND NEW ZELAND REVIT STANDARS	Australia 2012	Establece los requisitos mínimos requeridos para documentos de Revit compartidos en Australia y Nueva Zelanda
Building information Modeling (BIM) Guidelines	USC University of Southern California /Estados Unidos/2012	Esta guía define el alcance de trabajo y las entregas del Diseño y la Construcción para trabajos BIM en los proyectos de construcción de la Universidad del Sur de California (USC), las reformas importantes y otros proyectos, basados en la forma de contrato Design Bid Build.
National Guidelines for digital modeling	CRC (Cooperative Research Centers Association) para la Construction Innovation(Australia/2009	Presenta la visión general de BIM y las recomendaciones para desarrollar proyectos de manera colaborativa
Level of Development(LOD) Specification part I & commentary For Building Information Models and Data	BIM FORUM / Estados Unidos / 2018	La guía del nivel de desarrollo (LOD) es una herramienta de referencia destinada a mejorar la calidad de la comunicación entre los usuarios de BIM sobre las características de los elementos en los modelos. Proporcionar definiciones e ilustraciones de elementos BIM de diferentes sistemas de construcción en diferentes etapas de su desarrollo y uso en el proceso de diseño y construcción

DOCUMENTO	ENTIDAD	OBJETIVO
The VA BIM Guide	Veterans Affairs (VA) Office of Construction & Facilities Management /Estados Unidos/2010/	Con esta guía, VA se compromete a trasladar al BIM tanto a la organización como a sus proveedores de servicios, así como a integrar los requisitos del proceso del BIM y las metodologías del Integrated Project Delivery (IPD) en la entrega de proyectos
Statsbygg BIM Manual 2.0	Building Smart/Noruega/2018	Presenta los requisitos generales para las entregas BIM (IFC) y consta de conjuntos de requisitos digitales divididos por materia que pueden ser leídos por máquina y validados en software, para su uso en los proyectos de Statsbygg. Los conjuntos de requisitos digitales se encuentran en una base de datos donde pueden personalizarse para el proyecto y luego exportarse al formato buildingSMART mvdXML
Guia ASBEA Boas Práticas em BIM	Associação Brasileira dos Escritórios de Arquitetura (ASBEA)/Brasil/ 2015	La guía tiene como objetivo proporcionar a los profesionales y oficinas de arquitectura un manual de carácter didáctico, con el que facilitar el uso de esta valiosa herramienta de trabajo tan esencial en el desarrollo de proyectos, así como en el seguimiento de las etapas de su implementación
Singapore BIM Guide	Building and construction authority/ Singapore/2015	Esta Guía recopila las mejores prácticas que hacen posible la implementación del BIM a corto plazo. Con ella se pretende impulsar la adopción del BIM, la innovación y la transformación de su flujo de trabajo.
HDB BIM Guide	Housing and development Board/Singapore/2015	Esta guía está desarrollada para ayudar a los consultores y contratistas a usar el Modelo de información de construcción (BIM) en el diseño y construcción de nuevos desarrollos de viviendas públicas
COBIM Common BIM requirements	COBIN/Finlandia/2012	El objetivo principal del documento es disponer de una guía estándar de fácil adaptación y en constante evolución con el fin de aglutinar y coordinar a todas las disciplinas implicadas en la producción de modelos BIM con garantías de precisión adecuadas para su uso efectivo en el sector.
BIM Planning Guide For Facility Owners	The Pennsylvania State University, University/ Estados Unidos/ 2013	Esta guía se enfoca en las decisiones necesarias para definir los estándares de los procesos y prácticas en BIM, las estrategias de la integración del diseño de la información e identificar las estrategias contractuales apropiadas.
CMS expert guide to building information modelling (BIM)	CMS Law Firm. /Reino Unido/ 2017.	Esta guía de expertos reúne análisis de expertos legales, cubriendo los siguientes aspectos: implementación contractual de BIM, uso obligatorio de BIM en proyectos públicos, medidas públicas para implementar BIM, derechos y garantías de los propietarios, seguros.

DOCUMENTO	ENTIDAD	OBJETIVO
Estándares Argentina	BIM FORUM/Argentina/2018	Primera versión de los estándares propuestos por BIM Forum Argentina (BFA). El documento intenta recoger las mejores prácticas BIM, describe los requisitos básicos y los conceptos para el uso del BIM en proyectos de diseño, construcción y mantenimiento.
Handbook for the Introduction of BIM by the European Public Sector	Grupo de trabajo sobre BIM en la Unión Europea/Reino Unido/2018	Este manual proporciona un punto de referencia central para la introducción de la metodología BIM por parte del sector público europeo. Su objetivo es dotar a los clientes de la construcción gubernamentales y del sector público de los conocimientos que requieren para liderar su cadena de suministro industria
Building information Modeling (BIM) protocol	CIC /Reino Unido/2018	El Protocolo BIM primera puesta en marcha por el Consejo de la Industria de la Construcción (CIC) en 2013 como parte de su respuesta a la Estrategia BIM Gobierno del Reino Unido. El Protocolo fue elaborado para su uso con todos los contratos de construcción común (es decir, contratos para el diseño y la construcción por razón de un activo) y es compatible con BIM trabajar en el nivel 2.

Tabla 10. Relación de guías y normas asociadas a implementación de BIM en el mundo

Fuente: Información tomada de (Botero Botero, 2021)

En Latinoamérica, la implementación de BIM ha tenido unos avances significativos en la última década. En este sentido, se destacan los esfuerzos de BIM Gob Latam, organización compuesta por organizaciones del sector público de países de Latinoamérica y el Caribe, actualmente integrada por Costa Rica, Colombia, Uruguay, Brasil, México, Argentina, Perú y Chile, con un objetivo trazado de aumentar la productividad por medio de la transformación digital, y acelerando los programas a nivel nacional de implementación. (BIM GOB LATAM, 2020).

Estos países, tienen en sus planes la implementación de guías y normas en un horizonte de corto y mediano plazo. Seguidamente, se presenta un esquema con la proyección de adopción de BIM en cada uno de los gobiernos:

PAÍS	TIEMPO DE IMPLEMENTACIÓN																	
	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	
Argentina				2018-2025														
Brasil			2017-2028															
Chile		2016-2025																
Colombia						2020-2025												
Costa Rica					2019-2024													
México				2018-2023														
Perú				2019-2030														
Uruguay				2018-2025														

Tabla 11. Tiempo de implementación BIM en países vinculados a BIM FORUM LATAM

Fuente: Elaboración propia a partir de (BIM FORUM LATAM, 2021).

La encuesta BIM Latam, 2020, presenta los resultados y estadísticas de la implementación BIM, realizada en entre noviembre de 2019 y febrero de 2020 en 18 países de la región, con un número de 747 empresas latinoamericanas de sector de la construcción (588 casos de empresas que integran BIM en sus rutinas de trabajo y 159 que no utilizan la metodología). Esta encuesta estuvo orientada en su momento a determinar el grado de implementación de BIM en Latinoamérica.

Los resultados más relevantes de la encuesta son los siguientes:

SEGMENTO DE ACTUACIÓN	Años de Experiencia		
	Menor a 3 años	Entre 3 y 4 años	5 años o más
DISEÑO	39,80%	21,20%	39,00%
DESARROLLO BIM	52,80%	23,10%	24,10%
CONSTRUCCIÓN	52,70%	20,90%	26,40%

Tabla 12. Trayectoria en el uso de BIM por segmento de actuación

Fuente: Elaboración propia a partir de (BIM FORUM LATAM, 2021).

Los usuarios con mayor experiencia en el uso de BIM están determinados en el segmento de diseño (alrededor del 40% de las empresas que participan en este segmento reflejan cinco o más años de experiencia). Por el contrario, las empresas relacionadas al desarrollo y construcción se destacan entre las nuevas adoptantes, dado que un 52,7% ha incorporado BIM en los últimos 2 años.

PAÍS	Años de Experiencia uso BIM		
	Menor a 3 años	Entre 3 y 4 años	5 años o más
Chile	39,30%	30,30%	30,30%
Brasil	40,00%	22,50%	37,50%
Uruguay	40,90%	18,20%	40,90%
Colombia	42,70%	26,70%	30,70%
Argentina	44,80%	31,30%	23,90%
Guatemala	51,90%	25,90%	22,20%
Otros de América central y caribe	52,50%	17,50%	30,00%
Otros de Suramérica	53,30%	20,00%	26,70%
Costa Rica	53,70%	19,50%	26,80%
México	56,80%	18,20%	25,00%
Bolivia	72,70%	4,60%	22,70%

Tabla 13. Trayectoria en el uso de BIM por país

Fuente: Elaboración propia a partir de (BIM FORUM LATAM, 2021).

Chile y Brasil son los países que concentran las organizaciones de mayor trayectoria y experiencia en el trabajo con BIM además de Uruguay, Colombia y Argentina que conforman el grupo de países con organizaciones de mayor trayectoria (más de la mitad de los encuestados cuentan con al menos tres años de trabajo con BIM) (BIM FORUM LATAM, 2021).

PAÍS	Uso estándares BIM		
	No utilizan	Internos	Comúnes
Costa Rica	9,80%	53,70%	36,60%
Brasil	13,80%	65,00%	21,30%
Colombia	14,70%	64,00%	21,30%
Guatemala	18,50%	59,30%	22,20%
Otros de Suramérica	20,00%	56,70%	23,30%
Chile	27,00%	39,30%	33,70%
México	29,50%	45,50%	25,00%
Otros de América central y caribe	31,30%	40,00%	28,80%
Uruguay	31,80%	40,90%	27,30%
Argentina	32,80%	46,30%	20,90%
Bolivia	54,50%	31,80%	13,60%

Tabla 14. Uso de estándares por país

Fuente: Elaboración propia a partir de (BIM FORUM LATAM, 2021).

Las empresas encuestadas mostraron una amplia heterogeneidad en el uso de estándares a nivel regional. Las firmas costarricenses dieron cuenta del uso más significativo de estándares para el trabajo con BIM, mientras que en Bolivia menos de la mitad de las consultadas sigue estándares.

CRITERIOS	BENEFICIOS	Resultado %
Eficiencia y costos	Reducción de los conflictos de coordinación durante la etapa de obra	79,20%
	Reducción de retrabajos	72,70%
	Mejora en la eficiencia a través de la colaboración con propietarios u otros miembros	71,60%
	Reducción de costos de construcción	53,30%
Calidad y seguridad	Reducción de errores y omisiones en la documentación de obra	76,70%
	Mejora en la seguridad	49,70%
Control y plazos	Mejora en el control de costos (predibictibilidad)	67,20%
	Reducción en el ciclo de aprobación del cliente	56,10%
	Reducción de la duración integral del proyecto	51,30%

Tabla 15. Porcentaje de empresas según percepción de beneficios

Fuente: Elaboración propia a partir de (BIM FORUM LATAM, 2021).

Los beneficios percibidos sobre el proyecto por el de BIM son múltiples: las empresas encuestadas identifican un nivel significativo de mejoras (esto es, beneficios elevados o muy elevados) en las nueve dimensiones evaluadas, especialmente en las vinculadas a la etapa de ejecución de la obra.

#### **5.1.6. Adopción de BIM en Colombia.**

A nivel de Colombia, los primeros pasos en la implementación de BIM se dieron a mediados de la década pasada por iniciativa de empresas del sector privado. En la actualidad algunas del sector público (casos IDU-Instituto de Desarrollo Urbano de Bogotá, EDU-Empresa de Desarrollo Urbano de Medellín), han adoptado su implementación para el desarrollo de sus proyectos abriendo camino a la consecución de un estándar propio para nuestro País.

El Gobierno Nacional encabezó una estrategia de adopción de BIM, como resultado de la labor realizada por el DNP (Dirección Nacional de Planeación), Ministerio de Vivienda, Ministerio de Transporte y FDN (Financiera de Desarrollo Nacional), con la colaboración del Grupo de Trabajo BIM y el equipo del Global Infrastructure Program e (GIP), con la cual se pretende que para el año 2026 se cuente con la obligatoriedad para la implementación de BIM en los proyectos públicos a nivel nacional, generando un marco BIM colaborativo común para el sector y unos ahorros alrededor del 10 % en costos en proyectos de orden nacional (infraestructura y construcción)..

De acuerdo con lo indicado en el documento Estrategia de adopción de BIM en Colombia expedido por el DNP (Departamento de Planeación Nacional), los hitos (o etapas) para la implementación BIM en proyectos públicos en Colombia son los siguientes:

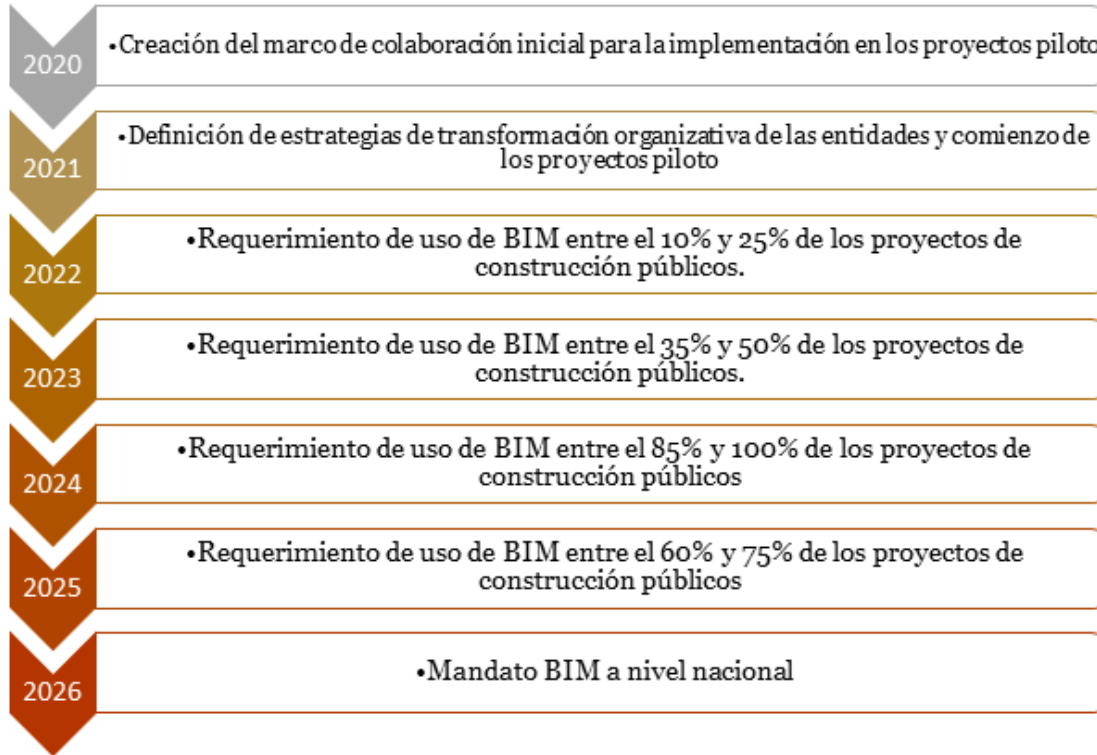


Tabla 16. Objetivos de implementación progresiva a 2026

Fuente: Elaboración propia a partir documento Estrategia de adopción de BIM en Colombia (Gómez, 2020)

La estrategia nacional está basada en 4 pilares con miras al cumplimiento de la meta país a 2026:



<b>PILARES / PLAZO</b>	<b>CORTO (2021-2022)</b>	<b>MEDIANO (2023-2024)</b>	<b>LARGO (2025-2026)</b>
<b>Comunicación y Difusión</b>	*Plataforma web *Comunidades BIM *Socialización estratégica	*Centro de conocimiento técnico *Publicar casos prácticos BIM	*Continuar con la difusión de los avances y beneficios de la metodología BIM
<b>Liderazgo público</b>	*Transformación organizacional *Fortalecer el grupo de trabajo BIM	*Análisis de impacto normativo (mandato) *Ampliar redes BIM (Ministerios/Territorio)	*Planes BIM en territorios *Implementación mandato BIM
<b>Desarrollo de capacidades</b>	*Comunidad académica *Apoyo a pilotos *Talleres/cursos BIM	*Criterios de certificación BIM *Fortalecer alianzas entre sectores	*Apoyar el proceso de certificación institucional e individual
<b>Marco colaborativo</b>	*Adopción de normas ISO 19650 *Guía y plantillas de apoyo a pilotos	*Retroalimentar y actualizar el marco *Instrumentos regulatorios BIM	*Evaluación del marco colaborativo

Tabla 17. Acciones para desarrollar en cuanto a 4 pilares principales de implementación BIM

Fuente: Elaboración propia a partir documento Estrategia de adopción de BIM en Colombia (Gómez, 2020)

El ICONTEC (Instituto Colombiano de Normas Técnicas) encargada del proceso de normalización y estandarización, adelanta el proceso de nacionalizar normas internacionales BIM de acuerdo con lo descrito en la siguiente tabla:

Norma NTC-ISO 19650-1-2021 (Icontec)	Norma NTC-ISO 19650-2-2021 (Icontec)	Norma NTC-ISO 19650-5-2021 (Icontec)	Norma NTC-ISO 16739-1-2021 (Icontec)	Norma NTC-ISO 12006-2-2021 (Icontec)
<p>Organización y digitalización de información en edificaciones en obras de ingeniería civil, incluyendo BIM (Building Information Modeling).</p> <p>Gestión de la información usando BIM. <u>Parte 1: Conceptos y principios</u></p>	<p>Organización y digitalización de información en edificaciones en obras de ingeniería civil, incluyendo BIM (Building Information Modeling).</p> <p>Gestión de la información usando BIM. <u>Parte 5: enfoque orientado a la seguridad en la gestión de la información</u></p>	<p>Organización y digitalización de información en edificaciones en obras de ingeniería civil, incluyendo BIM (Building Information Modeling).</p> <p>Gestión de la información usando BIM. <u>Parte 2: Fase de entrega de los activos</u></p>	<p>Intercambio de datos en la industria de la construcción y en gestión de inmuebles mediante IFC (Industry Foundation Classes).</p> <p><u>Parte 1: Esquema de datos</u></p>	<p>Organización de la información de las obras de construcción.</p> <p><u>Parte 2: Marco para la clasificación</u></p>

Tabla 18. Normas NTC ICONTEC nacionalizadas de la ISO 19650

Fuente: Elaboración propia a partir documento Estrategia de adopción de BIM en Colombia (Gómez, 2020) y (BIM FORUM LATAM, 2021)

Para promover esta estrategia país, la agremiación CAMACOL (Cámara Colombiana de la Construcción) crea BIM FORUM COLOMBIA como la “plataforma de carácter privado con la que se articulan actores y gestión del conocimiento en torno a la digitalización del sector de la construcción, con el fin de incrementar la productividad en las empresas y de la competitividad de la actividad edificadora en Colombia” (CAMACOL, 2021).

### 5.1.7. Concepto de Madurez

La madurez BIM es la mejora gradual y continua de la calidad, la repetibilidad y la previsibilidad dentro de la capacidad BIM disponible. Ésta se evalúa mediante el índice de madurez y se expresa por niveles (o hitos de mejora del rendimiento) a los que aspiran las organizaciones, los equipos y los mercados completos (BIMe Initiative, 2021).

La madurez BIM se puede denotar como una serie de actividades para mejorar los productos y flujos de trabajo de BIM y dirigidas también a mejorar el rendimiento actual por medio de un nuevo proceso, es decir, permitirá entregar buenos resultados gradualmente y con buena calidad (KINENERGY, 2021).

Puede referirse también a una serie de herramientas de medición, criterios de análisis y buenas prácticas con el fin de identificar las capacidades de en la organización y compararlas con estándares, e identificar procesos de mejora continua (Project-Tools, 2012).

#### **5.1.7.1. Nivel de madurez BIM**

El nivel de madurez corresponde a un punto en la evolución de BIM, para determinarlo se utilizan herramientas como los modelos de madurez permiten medir el grado de implantación o madurez BIM en un proyecto, e indica además la capacidad de la cadena constructiva para operar e intercambiar información (Tejedo Cerrato, 2021).

Los modelos de madurez tienen su origen en el campo de la gestión de calidad y establecen un conjunto de niveles de mejora en los procesos estandarizados que permite a las organizaciones que los implementan grandes beneficios como aumento de productividad, mayor retorno de la inversión (ROI) y la disminución de reclamos y costos de post entrega (Botero Botero, 2021).

A partir de dichos modelos propuestos para diferentes industrias, el investigador Bilal Succar estableció el índice de madurez BIM, en el cual se distinguen cinco niveles diferentes:

ÍNDICE DE MADUREZ	DEFINICIÓN
NIVEL 1: AD-HOC	Caracterizado por no tener estrategia definida ni procesos documentados, no existen roles BIM definido.
NIVEL 2: Definido	Con la existencia de políticas y procesos de implementación documentados. El proceso BIM comienza a implementarse y existen roles con responsabilidades definidas.
NIVEL 3: Gestionado	Se tienen estándares definidos y documentados los cuales son entendidos y compartidos por las áreas de la organización.
NIVEL 4: Integrado	Como su nombre lo indica se presenta cuando existe integración entre BIM y la estrategia de la organización.
NIVEL 5: Optimizado	Caracterizado por la búsqueda constante de actualizaciones tecnológicas para elevar el nivel de BIM en la organización.

Tabla 19. Índice de madurez

*Fuente: Elaboración propia a partir de (Botero Botero, 2021)*

A nivel nacional, la categorización de los niveles de madurez fue propuesta por la iniciativa BIM fórum Colombia la cual, para lograr su medición, desarrolló la herramienta RUTA BIM, pensada para todas las empresas de la cadena de valor de la construcción que tienen un proceso de implementación BIM en curso, o que planean implementar la metodología al interior de su organización (CAMACOL, 2020b). Es conveniente resaltar que el desarrollo de esta herramienta se basó en las investigaciones publicadas por el Dr. Bilal Succar, investigador independiente y fundador de BIM eInitiative.

La clasificación de los niveles de madurez propuestos para la herramienta de RUTA BIM en Colombia coinciden con la propuesta de los modelos de madurez de Bilal Succar:

- a) Nivel de madurez a (inicial): La implementación de BIM se determina por la falta de una estrategia general y una disminución significativa de políticas y procesos. Las herramientas

referentes a software BIM no se adoptan de manera sistemática y sin las previas investigaciones adecuadas.

- b) Nivel de madurez **b** (Definido): La implementación de BIM se caracteriza por la visión general de los altos directivos. La mayoría de las políticas y procesos están bien documentados, se resaltan las innovaciones de procesos y se pueden identificar las oportunidades de carácter comercial que nacen de BIM, pero aún no se explotan. El aumento de la competencia hace que BIM comience a perder importancia; sigue siendo impredecible la productividad del personal. Los aspectos básicos de BIM están a la mano, incluidos guías de flujo de trabajo, manuales de capacitación, y estándares de entrega BIM.
- c) Nivel de madurez **c** (Gestionado): la visión para la implementación de BIM es comunicada y entendida por la mayoría del personal. Los planes de acción detallados y un régimen de seguimiento se combinan con la estrategia de implementación de BIM; se reconoce como una serie de cambios de políticas, procesos y tecnología, que deben gestionarse pero no obstaculizando la innovación. Las oportunidades comerciales que nacen de BIM se reconocen y en los esfuerzos de marketing. Los roles BIM están adoptados por la organización y se logran los objetivos de desempeño del personal de manera más consistente. Aspectos como el modelado, la representación 2D, las especificaciones, la cuantificación y las propiedades de los modelos 3D se desarrollan mediante planes de calidad y estándares detallados. Los riesgos, las responsabilidades y las recompensas de la colaboración son claros dentro de proyectos temporales o las asociaciones a más largo plazo.
- d) Nivel de madurez **d** (Integrado): La implementación de BIM junto con los requisitos y la innovación de productos y procesos/se integran en los canales gerenciales, estratégicos, organizacionales y comunicativos. La selección e implementación de software sigue

objetivos estratégicos, no solo requisitos operativos. Los entregables de modelado están bien sincronizados entre proyectos y están estrechamente integrados con los procesos comerciales. El conocimiento está integrado en los sistemas organizativos. Las oportunidades de negocio que surgen de BIM son parte de la ventaja competitiva del equipo, la organización o el equipo del proyecto y se utilizan para atraer y retener clientes.

e) Nivel de madurez e (Optimizado):

Las partes interesadas del proyecto y de la organización han adoptado en su interior la visión BIM lográndola activamente. Se buscan oportunidades comerciales y soluciones innovadoras de procesos y productos. La selección y el uso de herramientas de software surte un proceso de revisión continua para la alineación de objetivos estratégicos y mejora de la productividad. Los efectos en los modelos organizacionales por la estrategia de implementación de BIM se revisan y realinean continuamente con diferentes estrategias. Si se necesitan modificaciones en las políticas o los procesos, se adoptan de manera proactiva. Se revisan y optimizan continuamente los entregables de modelado en beneficio de nuevas funcionalidades de software y las extensiones disponibles. Es permanente la optimización de aspectos como los canales integrados de datos, procesos y comunicación.

La herramienta evalúa diferentes aspectos:

- a) MADUREZ BIM: Corresponde a la mejora gradual y continua de la calidad, repetibilidad y predictibilidad en base a la capacidad BIM disponible. Los bloques de afirmaciones que deben ser calificadas cuantitativamente según el nivel de madurez, hacen referencia a:
- Tecnología: (Software, hardware, red interna)
  - Procesos: (Actividades y flujos de trabajo, modelos y usos BIM, liderazgo y gestión)
  - Políticas: (Entrenamiento, estándares, contractual)

b) **CAPACIDAD BIM:** Corresponde a unas habilidades mínimas que debe tener una organización para entregar resultados que sean medibles. Los bloques de afirmaciones hacen referencia a:

- Estatus de implementación BIM (Modelo basado en objetos)
- Colaboración BIM basada en modelos
- Integración basada en la red

c) **ESTRUCTURA DE TRABAJO BIM:** Los bloques de afirmaciones hacen referencia a:

- Organizaciones (liderazgo BIM)
- Equipos de proyecto (Capacidad de la empresa y sus proveedores de interactuar en ambiente colaborativo en diferentes contratos)
- Mercados (entorno BIM)

Cada aspecto del cuestionario tiene una asignación entre estos 5 puntajes, según su grado de implementación.

<b>Nivel de madurez</b>	<b>Puntaje</b>
Inicial	0
Definido	10
Gestionado	20
Integrado	30
Optimizado	40

Tabla 20. Niveles de madurez

Fuente: Elaboración propia a partir de (CAMACOL, 2020b)

Al final del formulario se realizan los promedios de las afirmaciones y de acuerdo con su resultado, se determina qué nivel de madurez obtiene la organización (Inicial, definido, gestionado, integrado, optimizado).

Continuando con otro aspecto importante en el marco teórico del presente trabajo de investigación, se presenta la información relacionada con de sistemas de transporte masivo, tema objeto de estudio.

#### **5.1.8. Sistemas de Transporte masivo**

Se entiende por transporte masivo de pasajeros como el servicio que se da a través de una combinación de infraestructura y equipos de una manera organizada cubriendo un alto volumen de pasajeros respondiendo también a un gran porcentaje de necesidades de movilización (Función Pública, 2018).

Existen diferentes sistemas de transporte clasificados por mediana y alta capacidad, por ello, para una mejor diferenciación de estas tecnologías, se presenta a continuación las principales características:

##### **5.1.8.1. El BRT (Bus Rapid Transit)**

El BRT por sus siglas (bus Rapid Transit) o autobuses expresos, es un sistema de transporte de mediana capacidad con características semejantes al sistema metro liviano, pero con costos de operación superiores a este sistema a pesar de que se requieren menores inversiones en su implementación. Se caracterizan por que su circulación se da en carriles exclusivos en zonas



urbanas, con la peculiaridad que el ingreso a los vehículos y el pago se lleva a cabo en estaciones a nivel del piso de los vehículos disminuyendo tiempos de embarque, desembarque de los pasajeros, tiempos de pago y cuyos beneficios se denotan para personas con movilidad reducida. (Jiménez, 2018) (Velásquez, 2015).

### 5.1.8.2. El Tranvía

Es un sistema que opera con vehículos equivalentes al metro liviano o ligero, pero con características en su operación en el que la señalización de la vía no es condicionada a la marcha del vehículo sino el criterio del propio conductor, aspecto conocido también como marcha a la vista. Este sistema es muy versátil y puede ser utilizado en calles con carriles compartidos con peatones y otros vehículos; se puede utilizar la señalización pública y semaforización de la zona para el control de su operación, esto a su vez, condiciona la velocidad de operación, situaciones que afectan su capacidad, la cual oscila entre los 6 mil y los 12 mil pasajeros/hora/sentido (Jiménez, 2018).

Ambos sistemas son denominados LRT (Light Rapid Transit) para los cuales la UIPT (Unión Internacional del Transporte Público), presenta estadísticas sobre sistemas, líneas, longitud y pasajeros movilizados, en los diferentes continentes, como lo muestra la siguiente tabla.

REGIÓN	Nro de Sistemas	Nro de líneas	Longitud (km)	Pasajeros movilizados/año (millones)
Asia-pacífico	42	133	1090	794
Eurasia	83	735	3483	2061
Europa	204	1276	9296	10422
Suramérica	8	10	110	151

<b>REGIÓN</b>	<b>Nro de Sistemas</b>	<b>Nro de líneas</b>	<b>Longitud (km)</b>	<b>Pasajeros movilizados/año (millones)</b>
<b>Norteamérica</b>	40	111	1596	770
<b>Medio Oriente y Norte de África</b>	11	37	238	415
<b>TOTAL</b>	<b>388</b>	<b>2302</b>	<b>15813</b>	<b>14613</b>

Tabla 21. Resumen estadísticas a nivel mundial de la red LRT

Fuente: Elaboración propia a partir de (UITP, 2019)

Se destacan por su longitud, las siguientes líneas construidas en diferentes ciudades en el mundo relacionadas en la siguiente tabla:

<b>Ciudades</b>	<b>Longitud en km</b>
Melbourne	250,00
San Petersburgo	246,00
Berlin	193,00
Moscú	181,00
Milán	180,00
Viena	178,00
Budapest	160,00
Dusseldorf	155,00
Dallas	149,00
Colonia	149,00

Tabla 22. Top 10 líneas de LTR más largas del mundo en km.

Fuente: Elaboración propia a partir de (UITP, 2019).

En cuanto a la perspectiva de crecimiento para nuevas infraestructuras de LRT en los próximos años, la UITP destaca que, para la congestión, mejorar la calidad del aire en las ciudades y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero que contribuyen al cambio climático (UITP, 2019), LRT continuará obteniendo el apoyo de los tomadores de decisiones y el público viajero. LRT es limpio, silencioso y ahorra espacio. Se espera que más de 1.000 km de proyectos LRT totalmente nuevos se abran para el servicio de ingresos en los próximos tres años.

### **5.1.8.3. El Metro ligero o liviano o LRT (Light Rapid Transit).**

Con el fin de atender las demandas de movilidad de los usuarios en las zonas urbanas, surgen los sistemas metro ferroviarios tipo LRT como una de las soluciones más importantes en los procesos de renovación urbana de las ciudades y particularmente alrededor del propio sistema (línea y estaciones) haciéndolo muy atractivo frente a otros sistemas de transporte, caracterizados también por tener demandas entre los 15.000 y 35.000 pasajeros/hora/sentido. El material rodante de este tipo de sistema tiende a ser más liviano frente a otros sistemas metro ferroviarios, por ello la termino asociado de metro ligero o liviano. Adicionalmente es un sistema enmarcado en la sostenibilidad dado que para su movimiento requiere energía eléctrica contribuyendo con cero emisiones en la etapa de operación (Jiménez, 2018).

El LRT o tren ligero se puede considerar como un sistema tranviario que circula en una plataforma totalmente segregada o parcial del tráfico vehicular y con prioridad semafórica. Tiene unas características de calidad importantes y confiables en términos de frecuencia, velocidad y tecnología informática avanzada además muy utilizado en varias regiones del mundo gracias a su eficiencia y comodidad (Metro de Medellín, 2021a).

Se considera un sistema versátil debido a su amplio alcance de rendimiento y definición y pensado como columna vertebral en el transporte público de las ciudades cumpliendo diversas funciones de movilidad. Cumple funciones de alimentador de sistemas de mayor capacidad (tipo metro pesado) o trenes de cercanías, conectando zonas perimetrales de ciudades como suburbios, complejos de abastecimiento y de negocios (Metro de Medellín, 2021a).

Varias ciudades referentes de los cinco continentes como Madrid, Barcelona, Dublín, Singapur, Túnez, Minneapolis, Edmonton, Amsterdam, Surrey, son solo algunas que hoy disfrutan de los beneficios de los metros livianos, los cuales han permitido aumentar su desarrollo y ofrecer a los ciudadanos una alternativa de transporte pensada en el medio ambiente (Metro de Medellín, 2021a).

#### **5.1.8.4. El Metro regional y Tren metropolitano**

A diferencia de los metros ligeros, este sistema de transporte masivo sobre rieles con alimentación eléctrica caracterizado por altas demandas de usuarios entre 40.000 y 80.000 usuarios/hora/sentido en horas pico, conectando centros urbanos, barrios y municipios entre sí. Las demandas máximas están acentuadas desde los barrios hacia el centro de las ciudades y en las tardes de forma contraria, en ciertos casos en modo subterráneo en las áreas centrales de las ciudades y a nivel de superficie saliendo a la periferia, con estaciones separadas entre 1200<sup>a</sup> 4000m y con intervalos aproximados alrededor de 3 minutos en horas pico (Velásquez, 2015)

### 5.1.8.5. El Metro urbano

Es un sistema sobre rieles con alimentación eléctrica que atiende zonas netamente urbanas, con demandas similares del tren metropolitano entre 40000 y 80000 mil pasajeros/hora/sentido. Cumple además con atender dichas demandas al largo de un día típico

En cuanto a la variable tecnológica, se caracteriza por el uso de vehículos de ruedas metálicas, considerando también como alternativa ruedas neumáticas, en casos aplicados como la tecnología francesa adoptada en París, Lille, Lyon, Santiago de Chile México, entre otras (Velásquez, 2015). Se consideran además sistemas segregados (vías férreas únicas) por el que no tiene contacto e interferencia con otro modo de transporte, con trazados generalmente elevadas y subterráneas en zonas de mayor consolidación en las ciudades a diferencia de trazados a nivel por fuera de estas zonas. Las distancias entre estaciones pueden variar entre los 500 y 2000 metros con material rodante (vagones) configurados entre 3 a 10 unidades dependiendo de la atención de la demanda y las necesidades. Esta configuración tiende a variar por las horas pico y su operación es centralizada de tipo semiautomática o automática (Jiménez, 2018).

La UIPT (Unión Internacional del Transporte Público), presenta estadísticas sobre número de ciudades, longitud, número de estaciones vagones y número anual de pasajeros movilizados tal y como lo muestra la siguiente tabla.

REGIÓN	NÚMERO DE CIUDADES	Longitud de la infraestructura (km)	Número de estaciones	Número de vagones	Nro anual de Pasajeros en 2019 (millones)
Asia-pacífico	84	10118	6824	75600	30537
Eurasia	16	909	593	10250	5029
Europa	46	3028	3032	25850	11021
Latinoamérica	19	1027	842	9900	6245

<b>REGIÓN</b>	<b>NÚMERO DE CIUDADES</b>	<b>Longitud de la infraestructura (km)</b>	<b>Número de estaciones</b>	<b>Número de vagones</b>	<b>Nro anual de Pasajeros en 2019 (millones)</b>
<b>Medio Oriente y Norte de África</b>	10	566	404	3700	1721
<b>Norteamérica</b>	18	1573	1269	13900	3704
<b>TOTAL</b>	<b>193</b>	<b>17221</b>	<b>12964</b>	<b>139200</b>	<b>58257</b>

Tabla 23. Características sistemas Metro por continentes.

Fuente: Elaboración propia a partir de (UITP, 2022).

A 31 de diciembre de 2020, los 193 sistemas de metro en conjunto componían una base de activos instalados de 731 líneas con una longitud total de más de 17.000 km y cerca de 13.000 estaciones (ver distribución por región en la tabla anterior). Aproximadamente 3300 km de nueva infraestructura se pusieron en servicio comercial entre principios de 2018 y finales de 2020. Esto incluye las líneas que se abrieron en nuevas ciudades metropolitanas en China, India, Australia, Indonesia, Pakistán y Qatar, pero también nuevas líneas o ampliaciones en ciudades metropolitanas ya establecidas.

La UITP también destaca las ciudades del mundo con mayor longitud de sus líneas con la presencia de ocho ciudades chinas en este grupo como lo muestra la siguiente tabla.

Ciudades	Longitud en km
Shanghai	694,00
Beijing	653,00
Seoul	527,00
Chengdu	519,00
Guangzhou	506,00
London	440,00
Shennzhen	411,00
New York	410,00
Tokio	381,00
Moscú	370,00

Tabla 24. Informe a 2020, metros más extensos del mundo

Fuente: Elaboración propia a partir de (UITP, 2022).

Aspectos como capacidad de los sistemas, instalaciones fijas, características operacionales, aspectos sistemáticos y aspectos socio urbanos son a menudo patrones de comparación muy usuales para determinar factores de diferenciación entre los diferentes sistemas de transporte de mediana y alta capacidad. En la siguiente tabla, se presentan las características de acuerdo con cada tipo de sistema de transporte:

Característica	BRT	TRANVÍA	METRO LIGERO	TREN METROPOLITANO	METRO URBANO
Capacidad de pasajeros	Media	Media	Media	Media o alta	Alta
Capacidad del vehículo (pasajeros/vehículo a 6 pasajeros/m <sup>2</sup> )	60-180	250 a 360	250 a 660	1600 a 6000	1800 a 6000
Capacidad del sistema pasajeros por hora por sentido	5.000 a 9.000	6.000 a 12000	15.000 a 35000	40.000 a 80000	40.000 a 80.000
Instalaciones fijas					

<b>Característica</b>	<b>BRT</b>	<b>TRANVÍA</b>	<b>METRO LIGERO</b>	<b>TREN METROPOLITANO</b>	<b>METRO URBANO</b>
Exclusividad de la Vía (%)	10 a 40	0 a 40	10 a 40	90 a 100	100
Control del vehículo	Manual	Manual	Manual	Sistema de señalización automática	Sistema de señalización automática
Estación, altura de la plataforma	Baja o Alla	Baja	Baja o Alta	Baja o Alta	Alta
Control de acceso a la Estación	Ninguno o Pleno	Ninguno o Pleno	Ninguno o Pleno	Ninguno o Pleno	Pleno
<b>Características operacionales</b>					
Máxima velocidad (km/h)	50 a 70	50 a 70	50 a 70	60 a 130	80 a 100
Velocidad operacional o comercial (km/h)	12 a 40	12 a 40	12 a 40	40 a 7D	25 a 60
<b>Aspectos sistemáticos</b>					
Distancia entre estaciones (km)	0,35 – 0,6	0,35 – 0,8	0,35 – 0,8	1.2 - 4.5	0.5 - 2
Distancia media de viaje	Media hacia Larga	Media hacia Larga	Media hacia Larga	Larga	Media hacia Larga
<b>Aspectos socio-urbanos</b>					
Corto plazo de implementación	No	No	No	No	No
Impacto en el desarrollo urbano	Medio	Alto	Alto	Alto	Alto
Facilita cambios culturales	Si	Si	Si	Si	Si

Tabla 25. Características técnicas y operativas de los sistemas de transporte masivo

Fuente: Elaboración propia a partir de (Velásquez, 2015) y (Jiménez, 2018)



### 5.1.8.6. Metro de Medellín

El proyecto Metro de la 80, objeto del caso de estudio del presente trabajo de investigación, corresponde a un sistema de mediana capacidad LRT. Dicho sistema fue estructurado por el Metro de Medellín (Empresa de Transporte Masivo del Valle de Aburrá Limitada) “creada el 31 de mayo de 1979, la cual se constituyó con el fin de construir, administrar y operar el sistema de transporte masivo, generando desarrollo y buscando ofrecer calidad de vida a todos los habitantes del Valle de Aburrá” (Metro de Medellín, 2021b).

Para llevar a cabo esta idea, se asociaron el Municipio de Medellín y el Departamento de Antioquia por partes iguales como accionistas, con el fin de posibilitar la creación de una empresa industrial y comercial del Estado, de nivel municipal, presidida por una Junta Directiva representada por el Gobierno Nacional, el Departamento de Antioquia, el Municipio de Medellín y la Empresa. La operación comercial inició el 30 de noviembre de 1995 en un primer tramo, entre las estaciones las estaciones de Niquía y Poblado. Posteriormente en 1996 se configuró la operación del sistema en las Líneas A y B (Metro de Medellín, 2021c).

Actualmente, la Empresa opera las siguientes líneas:

<b>Línea</b>	<b>Inicio de operación comercial</b>
Línea A – Metro	30 de noviembre de 1995
Línea B – Metro	29 de febrero de 1996
Línea K – Cable	07 de agosto de 2004
Línea J – Cable	03 de marzo de 2008
Línea L – Cable turístico Arví	09 de febrero de 2010
Línea 1 – Buses	22 de diciembre de 2011
Línea 2 – Buses	22 de abril de 2013
Línea T – Tranvía	31 de marzo de 2016
Línea H – Cable	17 de diciembre de 2016

Línea M – Cable	28 de febrero de 2019
Línea O – Buses eléctricos	30 de noviembre de 2019
Vía de enlace - Conecta las Líneas A y B	No presta servicio comercial
Línea P – Cable Picacho	10 de junio de 2021

Tabla 26. Líneas Metro de Medellín

Fuente: Elaboración propia a partir de (Metro de Medellín - M.I.G, 2021)

A continuación, se presenta la distribución geográfica de las líneas del metro de Medellín en la ciudad y el área metropolitana del Valle de Aburrá.



Ilustración 5: Líneas Metro de Medellín

Fuente: Metro de Medellín (Metro de Medellín, 2022c)

Para el Metro de Medellín, la estrategia es un aspecto determinante y por ende su desarrollo es un punto clave para el crecimiento de la empresa, orientando también al trabajo de todo el equipo de trabajo. La estrategia está enmarcada en el Plan Maestro que refiere a un direccionamiento estratégico, con políticas diseñadas para encauzar el crecimiento y desarrollo de la Empresa durante los próximos años (Metro de Medellín, 2022b).

#### **5.1.8.6.1. Plan Maestro “Confianza en el futuro”**

La Empresa formuló su plan estratégico 2001 – 2005 Nuestra visión en acción. En dicho plan se planteó un objetivo estratégico para el año 2005: estructurar un plan maestro para el Metro de Medellín con visión de largo plazo con el fin de enmarcar el crecimiento y desarrollo de la Empresa (Metro de Medellín, 2022b).

En el año 2004 la Empresa realizó un proceso de referenciación para identificar qué ciudades y sistemas de transporte masivo orientaban su crecimiento y desarrollo con planes de esta índole y se revisaron experiencias de Paris, Barcelona, Madrid, México, ciudades brasileñas, Buenos Aires, entre otros casos. Se identificaron diferentes modalidades agrupadas bajo los conceptos “Plan Maestro” y “Plan director” (Metro de Medellín, 2022b).

En el año 2005 se realizó el proceso de construcción del Plan Maestro 2006 – 2020 que se denominó “Confianza en el futuro”. Este plan se ha ido actualizando a la luz de los cambios del entorno. Cuando el Área Metropolitana del Valle de Aburrá culminó su plan BIO 2030, el Metro hizo la respectiva actualización del plan pasando del horizonte 2020 al 2030 y en 2020 realiza la actualización a 2050 a la luz de los nuevos estudios de planificación (Metro de Medellín, 2022b).

El Plan Maestro “Confianza en el futuro” tiene una visión de largo plazo que se cristaliza a través de planes estratégicos quinquenales (corto plazo). Este se ha convertido en el instrumento de planificación que permite prever el desarrollo y el ordenamiento de la Empresa en el futuro, en el marco de la vocación del territorio metropolitano y de sus conexiones regionales y nacionales. Provee el direccionamiento estratégico, con políticas diseñadas metodológica y coherentemente, para dirigir el crecimiento y desarrollo de la Empresa durante los próximos años (Metro de Medellín, 2022b).

El Plan Maestro se soporta en cuatro pilares para su construcción e implementación:



Ilustración 6: Pilares plan maestro Metro de Medellín

Fuente: (Metro de Medellín, 2022b).

a) Horizonte de tiempo

El horizonte de tiempo son los períodos de planificación a corto, mediano y largo plazo.

- a) Corto plazo 5 años: 2021 al 2025
- b) Mediano plazo 15 años: 2035
- c) Largo plazo 30 años: 2050

b) Planes Rectores

Los planes rectores son herramientas de planificación de las acciones organizacionales a corto, mediano y largo plazo, que definen el qué se va a hacer para inducir el logro del propósito superior, la MEGA y los objetivos estratégicos, garantizando la permanencia de la Empresa en el tiempo (Metro de Medellín, 2022b).



Ilustración 7: Planes rectores Metro de Medellín

Fuente: (Metro de Medellín, 2022b).

Es conveniente mencionar que el proyecto Metro de la 80 hace parte plan rector de expansión del sistema – PRES en el cual se encuentran indicadas las acciones relacionadas con el desarrollo de los corredores de transporte identificados por la Empresa que permiten la expansión de la red.

## **5.2. Estado del arte**

Para la revisión bibliográfica a partir de bases de datos internacionales, se realizó la búsqueda de información referente a dos temas principales: El primero, mediante la ecuación **BIM AND metro AND Implementation**, con el fin de conocer la implementación de la metodología BIM en proyectos de transporte masivo tipo metro y el segundo, artículos que relacionaran la terminología **BIM AND Railway AND Implementation** con el fin de tener una referencia complementaria en la implementación de la metodología BIM para proyectos de ferrocarriles.

En razón a lo anterior, se accedió a las bases de datos SCIENCE DIRECT y SCOPUS mediante una serie de búsquedas para esta fase del trabajo, haciendo referencia a estos dos temas principales y con la utilización del conector booleano (AND); con la combinación de éste y las diferentes herramientas de filtración de resultados que ofrecen estas bases de datos, se refinó la búsqueda de los artículos de referencia para determinar cuáles de ellos seleccionar y así disponerlos en el cuerpo del trabajo de la siguiente manera:

- a) Para la ecuación **BIM AND Metro AND Implementation** con el buscador SCOPUS, se encontraron 534 documentos, posteriormente con un primer proceso de filtrado en búsquedas avanzadas mediante “Título del artículo, abstract y palabras claves: BIM Metro” resultaron 42 documentos; seguidamente se filtra por Área Temática “Ingeniería” encontrando 37 documentos y finalmente por Tipo de documento “Artículos” surgieron 21 documentos.

Posteriormente con el buscador SCIENCE DIRECT, se encontraron 212 documentos, después con un primer proceso de filtrado de búsqueda avanzada mediante “Título del artículo, abstract y palabra clave: Metro” resultaron 26 documentos; seguidamente se filtra

por Tipo de documento “Artículos de Investigación” surgieron 23 documentos y finalmente por Área Temática “Ingeniería” resultaron 19 documentos.

Finalmente, con otra opción de búsqueda por GOOGLE SCHOLAR y la misma ecuación de búsqueda, se encontraron 11.100 documentos, posteriormente con una búsqueda avanzada con el criterio “Frase exacta BIM METRO” resultan 30 artículos.

Con los resultados de estos buscadores, en una etapa de examinación, se descartan 40 registros duplicados y se analizan nuevamente los restantes por importancia de contenidos obteniendo como resultado 20 artículos para inclusión.

- b) Para la ecuación **BIM AND Railway AND Implementation** con el buscador SCOPUS, se encontraron 922 documentos, posteriormente con un primer proceso de filtrado en búsquedas avanzadas mediante “Título del artículo, abstract y palabras claves: BIM Metro” resultaron 121 documentos; seguidamente se filtra por Tipo de documento “Artículos” encontrando 58 documentos y finalmente por Área Temática “Ingeniería” surgieron 50 documentos.

Posteriormente con el buscador SCIENCE DIRECT, se encontraron 395 documentos, después con un primer proceso de filtrado de búsqueda avanzada mediante “Título del artículo, abstract y palabra clave: BIM” resultaron 196 documentos; seguidamente se filtra por Tipo de documento “Artículos de Investigación” surgieron 96 documentos y finalmente por Área Temática “Ingeniería” resultaron 70 documentos.

Finalmente, con otra opción de búsqueda por GOOGLE SCHOLAR y la misma ecuación de búsqueda, se encontraron 14.100 documentos, posteriormente con una búsqueda avanzada con el criterio “Frase exacta BIM RAILWAY” resultan 44 artículos.



Con los resultados de estos buscadores, en una etapa de examinación, se descartan 71 registros duplicados y se analizan nuevamente los restantes por importancia de contenidos obteniendo como resultado 31 artículos para inclusión.

En razón a lo anterior, con la combinación de los 20 artículos finales resultantes de la ecuación BIM AND Metro AND Implementation y los 31 documentos de la ecuación BIM AND Railway AND Implementation, se incluyen 51 documentos finales para el desarrollo del estado del arte. No obstante, para mayor comprensión del proceso con ambos criterios de búsqueda se presentan los siguientes flujos con las descripciones mencionadas anteriormente:

**d) Tema de búsqueda BIM AND Metro AND Implementation**

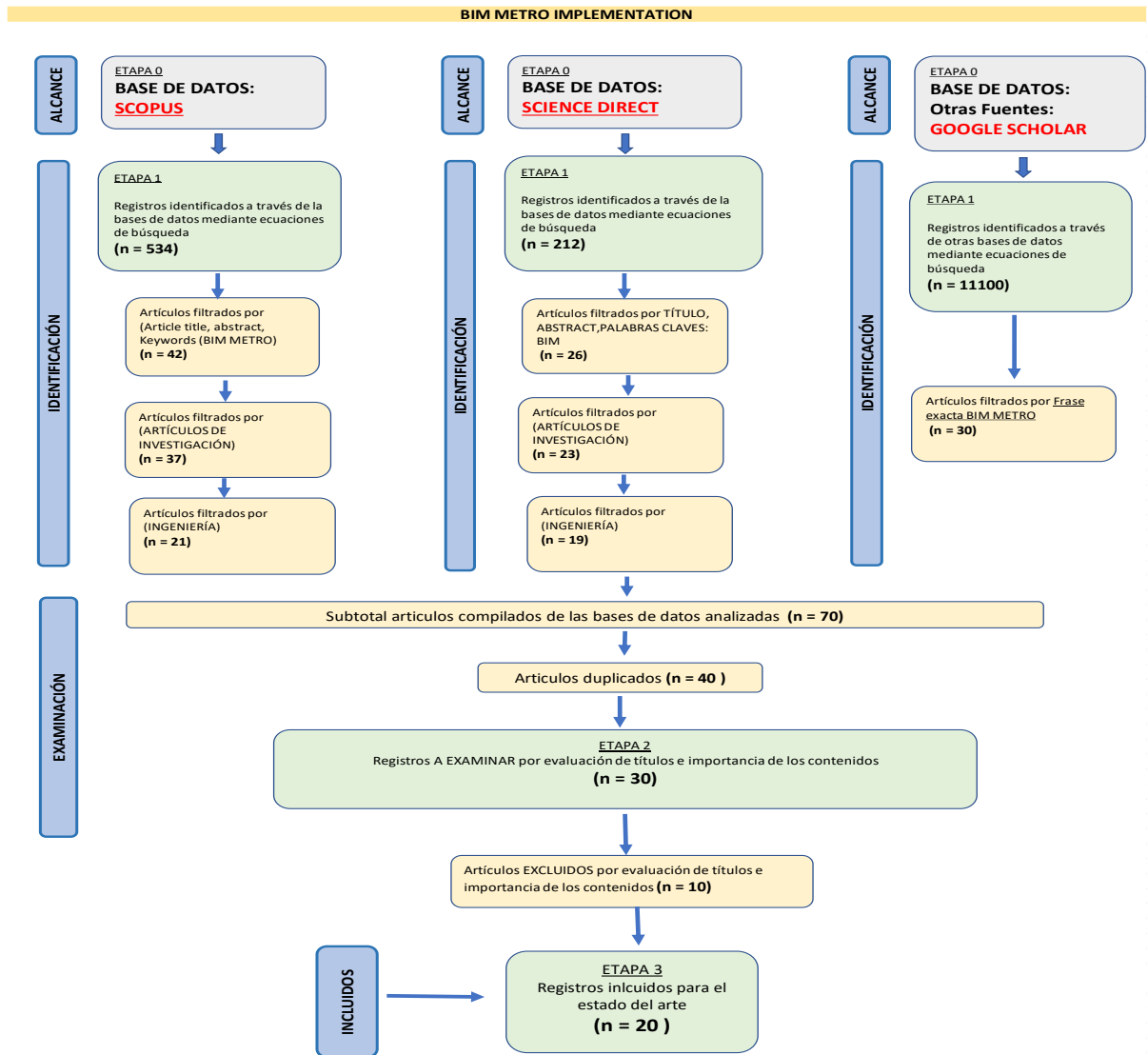


Ilustración 8: Flujograma proceso de filtrado de búsqueda artículos sobre BIM METRO IMPLEMENTATION.

Fuente: Elaboración propia.

e) Tema de búsqueda BIM AND Railway AND Implementation

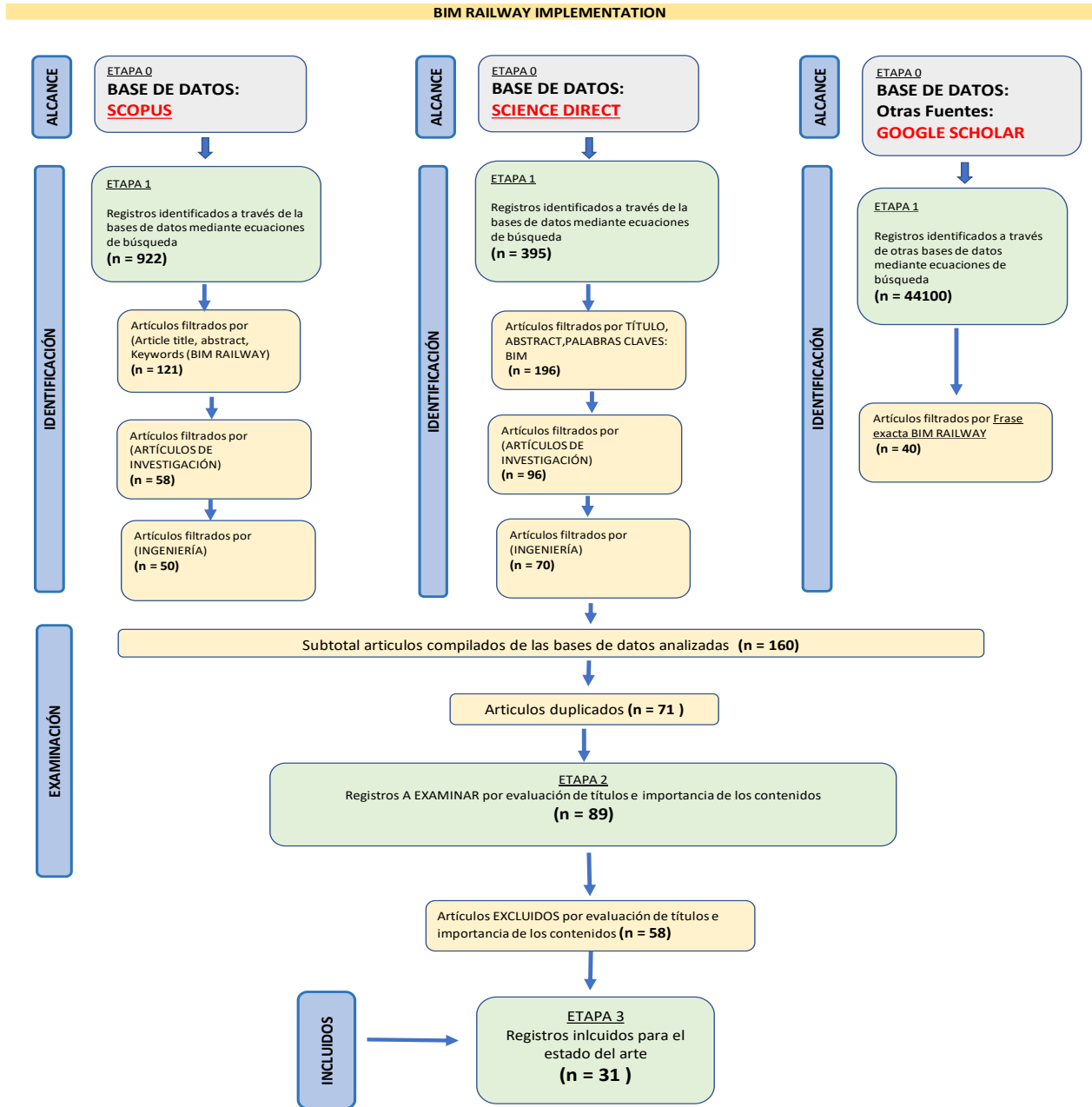


Ilustración 9: Flujoograma proceso de filtrado de búsqueda artículos sobre BIM RAILWAY IMPLEMENTATION

Fuente: Elaboración propia.

El enfoque para el estado del arte se planteó desde una serie de categorías tales como una corta introducción sobre complejidades en construcción de metros, posteriormente el análisis de casos de implementación de BIM en sistemas tipo Metro y demás proyectos férreos de transporte masivo como complemento a lo anterior.

### **5.2.1. BIM en sistemas tipo Metro urbano**

El proceso de planificación de los proyectos de construcción de metros inicia por el reconocimiento de aspectos complejos que no se pueden llevar a cabo sin conectar todas las partes interesadas desde el ámbito legal, económico, técnico y socio-ambiental. En este sentido, las complejidades de los nuevos proyectos se convierten en desafíos para la planificación y administración; cabe resaltar que hay una relación directa entre la complejidad y la participación de una variedad de partes interrelacionadas que deben ser gestionadas en cuanto a las condiciones de diferenciación e interdependencia. En efecto, cada tipo de proyecto tiene sus propias características y complejidades que conducen a una ambigüedad específica relacionada. Esto significa que para tener éxito en un proyecto de este tipo, requiere de soluciones de gestión que se seleccionan y ajustan según sus complejidades (Khosravi & Kähkönen, 2015).

Para el autor (Khosravi & Kähkönen, 2015) se relacionan dos tipos de complejidades: la interna, que analiza los cambios en la fase de construcción, la experiencia en estos tipos de proyectos, los inconvenientes financieros y la integración de las áreas interesadas como un elemento relevante, en la que para un número mayor de participantes se incrementa la posibilidad de fallar en la toma de decisiones en pro de la correcta ejecución del proyecto. Con respecto a los factores de complejidad externa, se deben tener cuenta aspectos socio ambientales y tráfico, por

la misma construcción del proyecto, en las cual es indispensable una matriz de riesgos en la fase planeación en la que se identifiquen las variables a controlar.

Para ilustrar la complejidad por el número de participantes en el proyecto, el autor presenta la siguiente tabla:

<b>Número de participantes en tres proyectos de Metro</b>				
<b>PROYECTO DE METRO</b>	<b>Longitud (km)</b>	<b>Número de Estaciones</b>	<b>Nro de Participantes principales</b>	<b>Nro de Subcontratistas</b>
SHIRAZ (Irán)	21,5	19	68	> 500
Extensión línea metro SPOO (Finlandia)	14	8	40	> 500
Línea y Estación subterránea Metro TORONTO (Canadá)	8,6	6	40	> 200

Tabla 27. Número de participantes en tres proyectos de Metro

Elaboración propia a partir (Khosravi & Kähkönen, 2015)

La falta de gestión en estas complejidades, dan lugar a un aumento en la probabilidad de retrasos en este tipo de proyectos. De acuerdo con lo mencionado por (Raja, Qadir, & Sasistharan, 2020), mediante un estudio que relaciona experiencias citadas por varios autores, los cuales identificaron 36 factores que definieron un marco general para establecer las causas de los retrasos del proyecto de construcción del proyecto de Metro de Riyadh en Arabia Saudita. La investigación fue realizada mediante una encuesta dirigida a 105 expertos. Luego de un análisis estadístico pormenorizado de las causas señaladas, se identificaron las cinco (5) más relevantes, de acuerdo con el ranking establecido en la investigación.

- a) Proceso de toma de decisiones del cliente y cambios en los procedimientos de control.

- b) Errores de diseño (incluidas ambigüedades y discrepancias de detalles/especificaciones)
- c) Nivel de habilidades laborales.
- d) Cambios de diseño por parte del Cliente o Consultor
- e) Problemas relacionados con los permisos / aprobaciones de otras partes interesadas.

Para este caso toman más relevancia factores de tipo administrativo del cliente, seguido por temas de carácter técnico (diseños) y al final problemas relacionados con procedimientos de trámites y permisos necesarios para abordar el proyecto.

Esta clase de proyectos se caracterizan por su variedad de complejidades e intervenciones en diferentes áreas de la ingeniería civil. El caso de la línea 5 del metro de Lyon en Francia no es la excepción; en dicho proyecto se intervinieron redes de servicios públicos (tales como acueducto y alcantarillado), redes de energía de alto voltaje, sistemas de telecomunicaciones (fibra óptica), sistemas electromecánicos, entre otros, por ello, el ensamble de procesos de tecnológicos con BIM son claves, tal y como lo afirma Ziv et al (2021) la ingeniería de sistemas y el modelado de información de construcción (BIM) son el corpus metodológico para el desarrollo de sistemas complejos y son el primer paso de un cambio mayor en la industria de la construcción.

Los trabajos de los investigadores en el tema se han centrado también en reportar casos de la implementación de BIM en proyectos metro y ferrocarriles, destacando los beneficios de su implementación. Estos casos se presentarán a través de bloques temáticos encontrados en dichos reportes de la literatura enfocados básicamente en beneficios de implementación de BIM, gestión de integración y comunicaciones con BIM, gestión de riesgos con BIM y beneficios de BIM en la fase de operación de los proyectos.

En cuanto a beneficios de implementación de BIM, el caso aplicado a varias estaciones del metro de Shijiazhuang en la China, donde se analizan las bondades de BIM en la fase de planificación y diseño general del proyecto tales como visualización tridimensional, detección de colisiones, cronograma de construcción, cálculo de cantidad de ingeniería, etc, mejorando la gestión, reducción de costos y controles en el proceso de construcción; este proyecto comprendía una longitud de 534m, cobertura del suelo entre 8m y 10m, longitud de cableados de 378m, además el autor recalca que “se ha obtenido un plan de construcción óptimo (método de deriva de ambos lados), optimizando la asignación de recursos de construcción (personal, maquinaria, materiales, etc.), acortando el período de construcción, ahorrando costos y logrando el propósito de una buena construcción” (Geng & Vojtasik (2008).

En la etapa de diseño para la adecuación de la estación Mairie des Lilies que pertenece a la línea 11 del Metro de París, se desarrolló un proyecto con un sistema de excavaciones subterráneas relevantes y otros importantes retos de ingeniería debido a la proximidad de estructuras de tipo urbano; acá el diseñador optó por realizar diferentes tecnologías para el diseño de estructuras, tales como análisis de elementos finitos a través del método de reacciones hiperestáticas, análisis de elementos finitos geotécnicos 2D y 3D y modelaciones BIM con unos resultados importantes en cuanto a reducción de tiempos en esta etapa (Bilosi S. et al., 2019).

El caso del túnel de metro Wehrhahn-Linie en Düsseldorf, Alemania, se creó un modelo integrado de información BIM en el proceso constructivo tunelero, para verificar su potencial y ventajas cuando se visualiza de forma interactiva datos de monitoreo de asentamientos dependientes del tiempo en un contexto consciente del medio ambiente, generando modelos de simulación numérica avanzada para predecir asentamientos (Koch et al., 2017).

Otros de los beneficios identificados por los autores en la implementación de BIM en proyectos subterráneos como las estaciones de metro, en las que es muy común cruzarse con

estructuras antiguas que interfieren con el proceso constructivo propio de este tipo, es la creación de modelos digitales mediante escaneo laser para detectar errores y posibles problemas en la etapa de diseño, brindando ventajas en la construcción, reconstrucción y creación de dibujos (Romanovich et al., 2021)

Para una exitosa gestión en los complejos subterráneos, la evaluación geotécnica se vuelve uno de los procesos más importantes para el diseño y la construcción de este tipo de obras, en donde las dificultades son evidentes. En una de las estaciones del Metro de Melbourne en Australia, se realizaron varios modelos BIM en los que el correcto intercambio de información de archivos Open BIM, facilitaron una adopción más acertada desde la etapa de diseño, dando cabida a un gran potencial en el uso de modelos avanzados y flujos de trabajo automáticos para agilizar procesos y mitigar la carga de trabajo de los ingenieros, protegiendo la precisión y la facilidad de uso de los datos (Huang et al., 2022).

En los procesos de ejecución de proyectos surgen distintas complejidades técnicas que se deben sortear mediante una correcta vinculación de las partes interesadas. Por ello las simulaciones con los modelos BIM juegan un papel importante en el análisis de situaciones propias de cada especialidad técnica, situación planteada por Ninić et al (2017) dando cuenta de la simulación para los túneles de la línea Wehrhahn (WHL) del metro en Düsseldorf, Alemania, en el cual se estableció un modelo a través de una plataforma de interacción, que permitió el intercambio automatizado de datos y generación flexible de modelos numéricos, situación que permitió una mayor asertividad en el control del proyecto en cuanto a la calidad de los datos y tomar decisiones frente a las complejidades de los procesos constructivos.

Otro caso importante es el proyecto metro de Doha en Catar, que, junto al desarrollo de los proyectos asociados al mundial de fútbol, la ciudad se ha convertido en uno de los sitios del mundo donde más se presentan desarrollos de proyectos de construcción en simultáneo. Este caso



particular, consistió en el diseño de cinco estaciones subterráneas de pasajeros y las instalaciones de la Red Line South Underground, desde Al Wakra hasta Lusail y conecta la Terminal 1 del Aeropuerto de Hamad con el centro Doha. Amerio M. (2020) recalca que el uso de BIM permitió el control integrado de la información, la resolución oportuna de discrepancias incluso durante el avance de las obras, la identificación y programación de los mantenimientos durante todo el ciclo de vida de las instalaciones. Esta clase de proyectos, se caracterizan por una carrera contra el tiempo para cumplir con las expectativas de entregas, reducción de costos y cumplimientos efectivos del alcance, por ello la importancia de la implementación de la metodología BIM desde la etapa de diseños, por lo que para este proyecto, esta nueva metodología permitió tomar decisiones de manera rápida y eficiente y aseguró un control completo del proyecto, lo que condujo reducir constantemente el cronograma y, en consecuencia, tanto los costos de diseño y construcción relacionados con cambios no presupuestados. (Amerio, 2020)

Otros resultados de investigaciones sobre implementación de BIM en metros del mundo reportan también la importancia de la gestión de integración y comunicaciones con BIM:

En el proyecto de metro de Hedong en Guangzhou, China, gestionaron la aplicación de una serie de métodos que incluyen la integración de diferentes modelos 3D paramétricos, el establecimiento del cronograma de construcción y el modelo 4D, así pues, se propusieron controles para lograr una gestión minuciosa de la construcción de este proyecto. No obstante, este no fue un proceso sencillo, toda vez que se presentaron algunas dificultades con la colaboración y el intercambio de la información, pero al final se obtuvieron los resultados esperados (Tian et al., 2015).

El proyecto de la Línea 9 del metro de Shenzhen en China, se gestionó por medio de una plataforma de aplicación de gestión de construcción de metro basada en BIM, tecnología de nube privada, uso de cámaras y sensores para lograr la integración electrónica, monitoreo dinámico de la operación y mantenimiento de instalaciones subterráneas (B. Liu & Sun, 2018), con ello, se permitió una adecuada integración del proyecto y eficiencias en el diseño. Esta situación dio lugar a que los mismos empleados del proyecto (mano de obra de construcción) reconocieran y comprendieran mejor los diseños establecidos y mejoraran ostensiblemente la calidad de los procesos constructivos complejos propios del proyecto.

Según lo menciona Jiang et al (2022), los modelos digitales se pueden utilizar para planificar y simular todo el proceso de construcción de forma científica y precisa. Por tal razón, las empresas de ingeniería continúan en la búsqueda de mejores prácticas e innovaciones para optimizar procesos en los controles de proyectos; ejemplos de integración de comunicación por red y tecnología inalámbrica se convierten en un ejemplo de efectividad en gestión de información con cronogramas. Tal es el caso respaldado por el Instituto de Tecnología de Guizhou (China), sobre un sistema integrado con estas tecnologías para predecir y optimizar la utilización del cronograma de construcción del proyecto de metro, en el que se describe que para el proceso de construcción del proyecto, la tecnología de comunicación de red inalámbrica puede proporcionar una buena base para la colaboración, que es esencial para el control del progreso del proyecto, la programación de tareas y la comunicación sistemática entre todas las partes. Con tecnologías de comunicación de la red inalámbrica LTE se pueden, analizar los factores que afectan el cronograma de construcción en la construcción del metro. Se realizó un experimento de simulación y se evaluó el efecto de optimización con indicadores SPI e CPI; los resultados experimentales finales muestran que es significativo utilizar el algoritmo del modelo BIM para

optimizar el proyecto del metro. En el experimento de simulación, la tasa de ahorro del período de construcción correspondiente después de la finalización del proyecto es del 6,94 %.

Es muy común observar dificultades en el proceso colaborativo de BIM y el proceso de comunicación entre los interesados es uno de los retos importantes a los que se enfrentan los proyectos comúnmente. De cara a lo anterior, BIM juega un papel importante en la comunicación entre las partes interesadas, lo que proporciona un medio para una correcta comunicación, proporcionando la resolución de problemas de calidad, cronograma y costo del proyecto causados por la mala comunicación entre las partes interesadas del proyecto (Y. Liu et al., 2020). Esta situación analizada en el proyecto metro de Nagpur en la India la tecnología BIM se llevó a cabo mediante una plataforma de gestión digital 5D BIM que buscaba analizar los beneficios de gestión digital para las principales partes interesadas y lograr un gran avance en el campo de la comunicación.

Otros resultados de investigaciones sobre implementación de BIM en metros del mundo reportan la importancia de la gestión de riesgos en BIM:

La gestión de riesgos surge como componente clave en el desarrollo y operación de proyectos de construcción de metros, tanto así, que se torna en unos de los elementos más importantes para garantizar los resultados óptimos al finalizar la etapa de construcción tal y como se resalta en el proyecto de la Línea 2 del Metro de Wuhan donde se incorporó una propuesta para la visualización del estado de seguridad en tiempo real, puede detectar riesgos de seguridad antes y durante el proceso de construcción y luego proporcionar medidas preventivas con el fin de tomar decisiones oportunas para evitar accidentes (Y. Zhou et al., 2013).

Con casos como el del proyecto de túnel submarino en la construcción del proyecto de la Línea 3 del metro de Xiamen en China, resaltaron también la importancia en la gestión integrada

de riesgos en una plataforma BIM la cual recopila no sólo la información de riesgo de un proyecto específico, sino que también retiene el riesgo información de proyectos anteriores y posibles soluciones (H. Zhou et al., 2020).

Otra serie de análisis realizados en varios proyectos de metros de China, particularmente en las ciudades de Shanghai, Shenzhe, Kunming, Zhengzhou y Wuhan, tal y como lo destaca Li et al (2018) partieron de la identificación de riesgos de seguridad con modelos BIM y cuyos resultados se orientaron a proponer un proceso de reconocimiento y realizar la adquisición de parámetros de ingeniería para la identificación de riesgos.

La gestión de equipos especiales de construcción cumple también un papel importante en cuanto al manejo del riesgo, requiriendo un constante monitoreo tal y como lo afirma C.Zhou et al (2019) en el que las tecnologías emergentes como CPS (Cyber Phisycal System), ofrecen un enfoque digital e inteligente para la seguridad monitoreo de actividades de elevación bajo condiciones de construcción extremas proporcionando comunicación en tiempo real entre el modelo BIM y sitio de izaje físico, en cuanto a funcionamiento de grúas especiales para el proyecto del túnel Sanyang del metro de Wuhan en la China. Los modelos BIM se convirtieron en gran ayuda tanto para el manejo de datos como para la visualización de las maniobras.

Los beneficios en la fase de operación en proyectos metro utilizando BIM ha sido señalada por investigadores:

En la etapa de operación de los proyectos de metro, la metodología BIM no pierde importancia, de lo contrario, sirve como herramienta de confiabilidad para una correcta gestión de operaciones de los sistemas, gestión de accidentes y la gestión de los activos. Problemas como los defectos estructurales de túneles de metro, deterioran el estado de operación amenazan la

seguridad pública; los métodos actuales de inspección de túneles se enfrentan problemas de baja eficiencia, alto costo de equipo y difícil manejo de datos (Xue et al., 2022). Por ello, a medida que los entornos urbanos se densifican y las ciudades de todo el mundo emplean metros urbanos subterráneos para el movimiento rápido y eficaz de millones de personas al día, existe una necesidad de garantizar la presencia y el funcionamiento seguro esos metros (Darroch et al., 2021).

Según refiere Kozin (2016), la aplicación de nuevas soluciones estructurales y tecnológicas durante el desarrollo de proyectos de construcción subterránea hace necesario desarrollar nuevos enfoques para la operación de las instalaciones, nuevas herramientas, medios y métodos para garantizar la seguridad de la operación. Para este caso del metro de San Petersburgo en Rusia, se realizaron una serie de monitoreos geotécnicos concatenándolos con los modelos BIM del proyecto. En este sentido los planes de emergencia juegan un papel clave en la gestión de emergencias de la operación del metro.

Una respuesta de emergencia bien preparada respaldada por planes contemplados en la gestión de riesgos puede mitigar en gran medida el impacto significativo de los incidentes de seguridad del metro, tal y como se gestionó en la estación de metro de ZhongNan Road Station en la China, que mediante un modelo BIM, el personal del metro puede tener una buena comprensión de su estación de trabajo al operar en el modelo BIM. Además, pueden tener acceso al sistema mediante el uso de computadoras portátiles, tabletas y teléfonos inteligentes (Luo et al., 2016).

### **5.2.2. BIM en otros proyectos ferroviarios (BIM RAILWAY)**

BIM ha sido igualmente aplicado en distintos proyectos ferroviarios. Los trabajos de investigación reportan igualmente beneficios de BIM y la utilización de algunas herramientas BIM.

La implementación de BIM en proyectos férreos se inicia en países desarrollados desde 2013. Igualmente, otros casos menos conocidos como el de la república Eslovaca ha sido también caso de estudio, por ello, la apuesta de los gobiernos que pretenden incrementar sus activos férreos debe ir encaminada a una correcta planificación de sus proyectos y lograr con ello beneficios en reducciones de tiempos y costos (Matejov & Šestáková, 2021). Por ello, es necesario que los actores (organismos públicos, gestores de proyectos, empresas privadas, oficina de ingeniería) asuman su papel pionero en el proceso (BENSALAH et al., 2019). Se requiere que se genere una conciencia en el sector ferroviario en cuanto a la importancia de aplicación de la metodología en todas las etapas del proyecto con el fin de alcanzar las metas y objetivos trazados. Para poder lograr estos beneficios, se requiere adoptar una serie de propósitos de uso de BIM para proyectos férreos como son los de mejorar los procesos de integración del diseño, la comunicación interna del equipo del proyecto y la detección de colisiones para eliminar el riesgo de volver a trabajar durante la construcción del proyecto y minimizar las demoras en el sitio (Bensalah et al., 2018).

El caso del ferrocarril de alta velocidad Beijing-Zhangjiakou (HSR) que se puso en servicio para los Juegos Olímpicos de invierno Beijing 2022, indica que la plataforma de diseño colaborativo basada en BIM disminuyó el tiempo de coordinación y enlace en un 8% y los costes de material en un 3%. Adicional, se desarrolló un sistema de simulación basado en BIM para la optimización de la organización de la construcción para respaldar la gestión orientada a los detalles y el control de calidad y seguridad en el sitio. Con uso de tecnología de construcción inteligente, la tasa de utilización de fuentes de agua no convencionales llegó al 22,14% y la proporción de materiales de construcción reciclables llegó al 15,30% (T. Wang, 2021).

En Marruecos, la implementación de BIM en varios proyectos férreos trajo beneficios reportados como colaboración, ahorro de tiempo, optimización de costes, prevención de conflictos entre redes, construcción antes de la construcción, optimización de la gestión de instalaciones,

mejora de la calidad de las obras y prefabricación. No obstante, el camino para llegar a estos beneficios no fue fácil, previamente se presentaron ciertos riesgos en (estado y apropiación del modelo BIM, falta de estandarización de versiones o software y falta de comprensión de los conceptos básicos de cronogramas y especificaciones) y limitaciones (falta de retroalimentación, adaptabilidad y convergencia de herramientas). Estas experiencias también han demostrado que el uso de BIM no es solo una transición tecnológica, sino una revolución en el proceso de gestión de proyectos, que requiere varios factores clave de éxito (participación de todos, compromiso, gestión del cambio y adopción del enfoque colaborativo (Bensalah et al., 2019).

La digitalización de proyectos ferroviarios tiene un impacto probado en la mejora de su resiliencia y eficiencia, al tiempo que reduce el costo total (S. Zhou et al., 2022), además de los controles de calidad exhaustivos en cada una de las etapas de implementación, con ello, se garantiza la mejora en la precisión de la planificación, la seguridad de los costos como los factores de éxito producto de la implementación de la metodología BIM (Häußler & Borrmann, 2020).

BIM juega un papel importante en las fases del ciclo de vida de los proyectos férreos desde el diseño hasta la operación. Esas bondades son el fruto de estudios juiciosos que dan cuenta de la importancia de su implementación hasta alcanzar objetivos de productividad y rentabilidad de estos, por ejemplo, el gobierno de Australia pone gran énfasis en el desarrollo y la expansión de sus redes ferroviarias para mejorar la productividad y atender las crecientes necesidades y demandas de las empresas y los viajeros. Los fenómenos de sobrecostos son un problema complejo y desafiante de abordar, por ello, existe la necesidad de determinar mejor las contingencias de costos de construcción con el uso de formas colaborativas mediante BIM brindando a los propietarios de activos del sector público y privado encargados de entregar y mantener redes ferroviarias la confianza de que los proyectos se pueden entregar de manera rentable y son

resistentes a eventos inesperados y adaptables a necesidades, usos o capacidades cambiantes (Love et al., 2017).

Una de las formas de minimizar las variaciones de los proyectos generadas por las complejidades propias de este tipo de proyectos es la vinculación de la metodología BIM. Casos como diseño del proyecto férreo en el puerto del Venecia (Italia), en el cual BIM proporcionó múltiples beneficios según lo mencionado por Pasetto et al (2020) en el que gracias a un enfoque multiescala derivado tanto del modelado/computación tradicional como del nuevo enfoque BIM, el diseñador pudo evaluar la mejor solución entre tres diseños alternativos. Un análisis multicriterio vinculó los datos del modelo a escala geográfica, que funcionó como un enlace a diferente información 3D, a la información sobre el sitio de construcción y los costos.

En el diseño ferroviario, uno de los puntos más complejos a tratar es el de los desvíos en el alineamiento. Estos cambios o cruces deben ser diseñados con altos estándares toda vez que se pueden evitar descarrilamientos de los vehículos férreos, por ello Kaewunruen & Lian (2019) refiere que por la complejidad de los desvíos ferroviarios, factores como la eficiencia y la eficacia del mantenimiento se pueden mejorar integrando la práctica existente mediante el modelado de información de construcción (BIM). Este caso establece analiza el primer BIM 6D del mundo para la gestión del ciclo de vida de un sistema de desvío ferroviario. El BIM (Nivel 3) ha integrado 6 dimensiones de información de datos de campo basadas en las plataformas Revit-2018 y Navisworks-2018. Los gemelos digitales de un desvío ferroviario en 3D abarcan el cronograma, los costos y la sostenibilidad a lo largo de todo el ciclo de vida. El uso de BIM para sistemas de desvíos ferroviarios tiene el potencial de mejorar el flujo de información general de la planificación y diseño de desvíos, premontaje y logística de fabricación, construcción e instalación, operación y gestión y demolición, logrando así un mejor rendimiento y calidad del proyecto.



Para el campo de la construcción ferroviaria, los tipos de instalaciones MEP (mecánica-eléctrica y de plomería) cobran gran importancia al igual que los demás procesos constructivos. BIM también ofrece cohesión en estas especialidades como un sistema de gestión de instalaciones para compartir información entregada de fases anteriores y mejorar la eficiencia y seguridad de la gestión de MEP durante el período de operación y mantenimiento. Además, se puede proporcionar escenas de construcción virtuales con escalas apropiadas para que varios participantes se comuniquen y cooperen entre sí (Hu et al., 2016).

También se pueden obtener beneficios de aplicabilidad de la metodología BIM en una de las secuencias constructivas como lo es la construcción de terraplenes. Por medio de los comportamientos de gemelos digitales se pueden obtener datos para un modelo de proceso con el fin de optimizar el diseño de terraplenes ferroviarios, utilizando datos actuales e históricos del contexto y los activos para calibrar los modelos y simulaciones (Davila Delgado & Oyedele, 2021).

Diferentes herramientas tecnológicas han sido utilizadas como herramientas de modelación BIM en proyectos ferroviarios:

Aplicaciones como la realidad aumentada (AR) contribuyen también a comprender los proyectos desde sus etapas iniciales, tal y como lo indica Kim et al. (2017) al utilizar información de procesos 4D y 5D, se pueden identificar mediante modelos, aspectos como errores de diseño en la programación, el orden del proceso o las interferencias. El sistema de verificación basado en AR (realidad aumentada) puede mejorar la comprensión de los dibujos y será más útil para los procesos de construcción ferroviaria.

Los procesos de toma de datos a través de escaneo con nubes de puntos son una herramienta esencial para determinar soluciones en la etapa de diseño. Por ejemplo, para infraestructuras ferroviarias existentes se utilizan comúnmente modelos construidos creados a

partir de datos de nubes de puntos escaneados como el monorriel de Osaka en Japón, estructura ferroviaria con sistema de, compuesta por 44 pilas de diferentes tipos de geometrías de cimentación (Hidaka et al., 2018). Otra apuesta similar, es la aplicación a un componente importante de la infraestructura férrea como son los rieles, en el que se presenta el caso de una metodología completamente automatizada capaz de extraer y delinear de manera confiable la posición y la geometría de los rieles a partir de datos de nubes de puntos tridimensionales (3D) de la infraestructura ferroviaria para la posterior construcción del modelo BIM (Soilán et al., 2021).

Otro caso importante, es la aplicación a un sistema integrado de gestión de la construcción utilizando modelos BIM en el que Cho et al (2011) refiere la experiencia en un tramo del ferrocarril de alta velocidad de Honam en la China. Este sistema se compone principalmente de modelos de información 3D de rango completo y modelos de sistema 5D basados en la web., el cual está compuesto los módulos de gestión de equipos y seguridad que utilizan la realidad virtual, así como el sistema de control de cantidad de movimiento de tierras 4D. A través del sistema integrado de gestión de la construcción basado en BIM, se pudo lograr una gestión integrada en obra, especialmente en las mejores condiciones de ajuste de costes, gestión de la obra y seguridad.

Según lo acotado por Cheng et al (2019), se desarrolló una técnica general para el modelo BIM, identificando previamente los diferentes tipos de componentes (carriles, secciones transversales, tuberías, equipos de catenaria y refugios) y crear BIM paramétricos para túneles ferroviarios de vía única mediante nubes de puntos, utilizando Laser Scanning (Escaneo Láser Terrestre). Puede entenderse con lo anterior, que esta clase de proyectos tienen unos requisitos muy rigurosos, pero necesarios para alcanzar un rendimiento de red confiable, sostenible y seguro. Por ello, el Modelado (BIM) puede ser beneficioso para dicha práctica debido a sus características de representación virtual e integración de información (G. Wang & Zhang, 2021).

En las etapas de planificación de líneas ferroviarias generalmente se requería que los ingenieros diseñaran en función de su propia experiencia después de una serie de visitas de campo, lo que generaba una gran carga de trabajo y baja eficiencia, además, la gestión de la operación y el mantenimiento es más complicada debido a la abundancia de equipos en las estaciones de ferrocarril. Con base en estas premisas, Wu & Zhang (2022) menciona además un método de planificación y diseño de líneas de transporte ferroviario basado en la tecnología (BIM) mediante LocaSpace Viewer (programa de modelado visual tridimensional 3D) del entorno ferroviario para mejorar la eficiencia de la planificación y el diseño de líneas ferroviarias. Al final, se muestran y analizan el efecto de diseño del modelo, el rendimiento del sistema de gestión visual y los resultados de las pruebas de retardo de transmisión de la red. Los resultados muestran que mediante BIM puede construir el modelo de visualización 3D con alta fidelidad para el entorno ferroviario desde la fase de diseños.

Por otra parte, con respecto a diseños de proyectos subterráneos férreos, Steuer et al (2014) resalta que son un ejemplo de reto constante y una tarea interdisciplinaria muy compleja, que involucra a muchas partes interesadas. En estos tipos de diseños, se pueden identificar diferentes herramientas de modelación BIM, tal es el caso del software de creación OpenRail Designer de Bentley BIM, comúnmente adoptado para el diseño de infraestructuras ferroviarias; el modelo 3d representación del estudio se llevó a cabo para toda la longitud del tramo equivalente a 728 m. (Fabozzi et al., 2021). También se destaca, la integración de BIM y GIS como plataforma de diseño colaborativa integral que junto con el modelado geológico 3D y los métodos de construcción previstos para en el Proyecto del Túnel férreo en Melbourne (Australia), tuvo como objetivo formar una base confiable para las decisiones y la gestión durante el ciclo de vida del proyecto subterráneo (Huang et al., 2021).

En el campo estructural, BIM también aporta soluciones para lograr efectividad en los procesos de diseño en un caso de un puente ferroviario tal y como lo registra Akula et al (2013) en el que las tecnologías de imágenes 3D se utilizaron para mapear las ubicaciones de las barras de acero de refuerzo dentro de una sección de un puente ferroviario. Una vez que se procesaron las nubes de puntos, las zonas que son seguras para la perforación se detectaron automáticamente y se registraron en el modelo BIM, el cual se usó para proporcionar información en tiempo real al operador de la perforadora sobre si es seguro continuar perforando en función de la posición y la orientación de la perforadora. Los resultados indicaron la viabilidad de la retroalimentación en tiempo real para mejorar la seguridad, la productividad y la calidad de la ingeniería procesos al ayudar a evitar el tiempo y el costo del retrabajo.

Los aspectos ambientales juegan un papel preponderante en cuanto a la operación de los sistemas férreos. De acuerdo con una investigación realizada por Akponeware et al (2022), los resultados arrojan luz sobre los problemas subyacentes que rodean la evaluación del carbono ferroviario. Los hallazgos confirman que las regulaciones actuales de evaluación de carbono en la industria de infraestructura ferroviaria del Reino Unido, debido a su falta de prescripción, no logran impulsar la reducción de carbono a largo plazo. Sin embargo, es conveniente señalar que los análisis de los comentarios de los entrevistados mostraron un uso limitado de técnicas basadas en BIM en la evaluación del carbono dentro de la industria ferroviaria del Reino Unido.

En este mismo sentido, los consumos energéticos en los sistemas ferroviarios son una preocupación constante en las fases de operación. Casos como el de la aplicación de una metodología novedosa para la estimación de la demanda energética del parque ferroviario, la cual desarrolla un enfoque de modelado ascendente implementado en una herramienta de simulación para evaluar la huella energética y los ahorros potenciales de los edificios ferroviarios. Estos

aspectos, fueron modelados y simulados por medio de software BIM y BEM (Building Energy Modeling), como Autodesk Revit y OpenStudio/ Energyplus (Barone et al., 2022b).

De igual manera se destaca la experiencia presentada por parte de (Barone et al., 2022a), en el que se analiza el componente de los sistemas de ventilación en los vagones de un sistema férreo mediante simulaciones con varias herramientas BIM, que permitieron evaluar el riesgo de contagio de Covid-19 relacionado con los escenarios investigados. Para probar las capacidades del enfoque propuesto y mostrar la reducción del riesgo de infección por Covid-19 potencialmente alcanzable variando las estrategias de ventilación adoptadas, se presenta un estudio de caso adecuado relacionado con un tren de media distancia existente que opera en el sur/centro de Italia. Las simulaciones numéricas realizadas arrojan resultados interesantes que proporcionaron también criterios útiles de diseño.

En cuanto a la fase de operación de los proyectos férreos, la adopción de BIM se convierte en uno de los principales retos con el fin de garantizar la tanto la seguridad como las eficiencias en el sistema, por ello, el sector ferroviario está acelerando la automatización en los procedimientos de inventario e inspección (Grandio et al., 2022), esto para minimizar las fallas generadas por este tipo de aspectos con sistemas de información robustos que permita conocer a detalle cada elemento del sistema.

Tanto los sistemas de señalización como la información al usuario de los sistemas férreos deben ir en continua evolución de acuerdo con las necesidades actuales. Según Motamedi et al (2017), se realizó una investigación de un método que integra entornos BIM y VR (realidad virtual) para analizar la visibilidad del sistema de señalización en un proyecto férreo en Japón. La herramienta desarrollada registra el área de visibilidad de una señal y calcula la distancia y el ángulo de visualización de un peatón de cierta altura. La simulación del movimiento de los peatones también se realiza en esta herramienta.

Los métodos tradicionales de inspección ferroviaria en las etapas de operación son laboriosos, requieren mucho tiempo y, en ocasiones, son peligrosos. Como solución alternativa, se han desarrollado y utilizado robots de inspección ferroviaria, con ello mejorar la digitalización de los activos ferroviarios. administración. Especialmente, con el desarrollo de BIM, los robots de inspección pueden beneficiar significativamente la gestión de activos ferroviarios en un futuro próximo (Jing et al., 2022).

## 6. RESULTADOS

A continuación, se presentan los resultados obtenidos a partir de las herramientas metodológicas planteadas en el capítulo 4 del presente trabajo de investigación.

### **6.1. Diagnóstico del estado de implementación BIM en la Empresa Metro de Medellín a partir de un modelo de madurez.**

Para conocer el nivel de madurez BIM actual de la Empresa y establecer las acciones que se deberán llevar a cabo para alcanzar el nivel de madurez esperado, se estableció un diagnóstico desde el punto de vista organizacional y tecnológico a partir de una matriz de madurez.

Para el ejercicio inicial de diagnóstico (año 2022), se utilizó la herramienta RUTA BIM del BIM FORUM COLOMBIA, el cual se basa en el modelo de madurez desarrollado por el investigador Bilal Succar, para la autoevaluación de las organizaciones de la cadena de valor de la construcción y el desarrollo de la metodología en las organizaciones o equipos del proyecto. La herramienta permite identificar el nivel de madurez de la organización mediante 3 componentes: madurez BIM, capacidades BIM y escala organizacional.

- a) Madurez BIM: evalúa los usos de la metodología en la organización y orienta cómo abordar los requerimientos necesarios para que la empresa mejore gradualmente su implementación. Este apartado está dividido en 3 bloques: tecnología, procesos y políticas y refiere a una serie de opciones para calificar cada aspecto cuantitativamente tales como:
  - La tecnología permite evaluar la infraestructura de la organización a través el software (elección del software, usos modelos 3d, almacenamiento e intercambio información, flujos de información), el hardware (especificación y gestión, inversión planificada

- hardware), y red interna (soluciones aplicativos para trabajo colaborativo, intercambio de información-grado de adopción en la empresa, conexión-infraestructura de red).
- En los procesos, se evalúa los recursos actividades y flujos de trabajo (roles BIM, transversalidad, resultados y productividad, los modelos y usos BIM ((grado adopción de los niveles de desarrollo BIM), el liderazgo y la gestión (visión organizacional. estrategia de implementación y oportunidades de negocio)
  - Las políticas, permite evaluar estándares con aspectos asociados a entrenamiento, estándares y requerimientos contractuales)
- b) Capacidades BIM: Ayuda a identificar los procesos y definir su aplicación en la organización realizando un balance del cómo se está llevando a cabo el proceso. Este apartado y refiere a una serie de opciones para calificar cada aspecto cuantitativamente tales como:
- Modelos basado en objetos (estatus de implementación BIM), colaboración BIM (participación-grado de adopción del trabajo colaborativo entre actores del proyecto) y trabajo colaborativo BIM (grado de respeto de los lineamientos definidos para el trabajo colaborativo), integración basada en la red (participación de integrantes-grado de participación de los diferentes actores y sus disciplinas con sus modelos en uno solo integrado) e integración de la información-grado de adopción de protocolos definidos para la integración de modelos con mejora continua.)
- c) Escala organizacional: Corresponde a una clasificación de la evaluación del desempeño que permite y utilizar el lugar de la empresa frente al uso de la metodología la comparación con otra en comparación con otras empresas de la industria. Este apartado refiere a una serie de opciones para calificar cada aspecto cuantitativamente



tales como: Organizaciones (liderazgo BIM), equipos de proyecto y entorno BIM (mercados) (CAMACOL, 2020a).

En el ANEXO 1, Cuestionario herramienta RUTA BIM CAMACOL, se presenta el contenido a detalle de todos los aspectos relacionados. Es necesario indicar que tanto el ejecutor de este trabajo Rubén Dario Alzate Agudelo, como Jeamy Joe Baena Tirado, ambos Profesionales 1 de la Gerencia de Planeación del Metro de Medellín y que hacen parte de la oficina de proyectos (Proyecto BIM), fueron los encargados de diligenciar este cuestionario, además de la calificación de los niveles de madurez que se describirán en posteriores líneas.

Cada aspecto, se calificó mediante los criterios establecidos como niveles de madurez, con una asignación cualitativa de acuerdo con la siguiente tabla:

<b>Nivel de madurez</b>	<b>Puntaje</b>
Inicial	0
Definido	10
Gestionado	20
Integrado	30
Optimizado	40

Tabla 28. Niveles de madurez RUTA BIM

Fuente: Elaboración propia a partir de herramienta RUTA BIM.

Estas calificaciones fueron aplicadas a cada aspecto relacionado en el cuestionario y posteriormente se promediaron los resultados en los subcapítulos arrojando un puntaje determinado. En este sentido, se relaciona a continuación el resumen de los resultados obtenidos que corresponden a la evaluación del nivel de madurez actual (2022). Como metas de comparación fijadas al interior de la organización, se proyectaron unos indicadores a nivel numérico al año 2025 (fase 1) y posterior a 2025 (fase 2).

CRITERIO		NIVEL MADUREZ ACTUAL	NIVEL DE MADUREZ ESPERADO en FASE 1 proyectado a (2025)	NIVEL DE MADUREZ ESPERADO en FASE 2 proyectado posterior a (2025)
<b>MADUREZ</b>				
	<b>Tecnología</b>			
1	SOFTWARE	0,0	22,5	35,0
2	HARDWARE	0,0	20,0	30,0
3	RED INTERNA	6,7	23,3	33,3
	<b>Procesos</b>			
4	ACTIVIDADES Y FLUJOS DE TRABAJO	3,3	20,0	33,3
5	MODELOS Y USOS BIM	20,0	30,0	40,0
6	LIDERAZGO Y GESTIÓN	10,0	23,3	36,7
	<b>Políticas</b>			
7	ENTRENAMIENTO	10,0	20,0	40,0
8	ESTÁNDARES	2,5	17,5	40,0
9	CONTRACTUAL	10,0	20,0	40,0
<b>CAPACIDAD</b>				
10	IMPLEMENTACIÓN BIM	0,0	10,0	30,0
11	COLABORACIÓN BIM	0,0	20,0	40,0
12	INTEGRACIÓN BASADA EN LA RED	0,0	10,0	30,0
<b>ESTRUCTURA DE TRABAJO</b>				
13	ORGANIZACIONES	10,0	20,0	30,0
14	EQUIPOS DE PROYECTO	0,0	10,0	20,0
15	(MERCADOS) ENTORNO BIM	0,0	10,0	20,0

Tabla 29. Resultados aplicación cuestionario RUTA BIM CAMACOL

Fuente: Elaboración propia

En razón a lo anterior, se presenta a continuación el gráfico comparativo correspondiente a los resultados obtenidos con el autodiagnóstico (actual) y lo esperado para las siguientes fases:

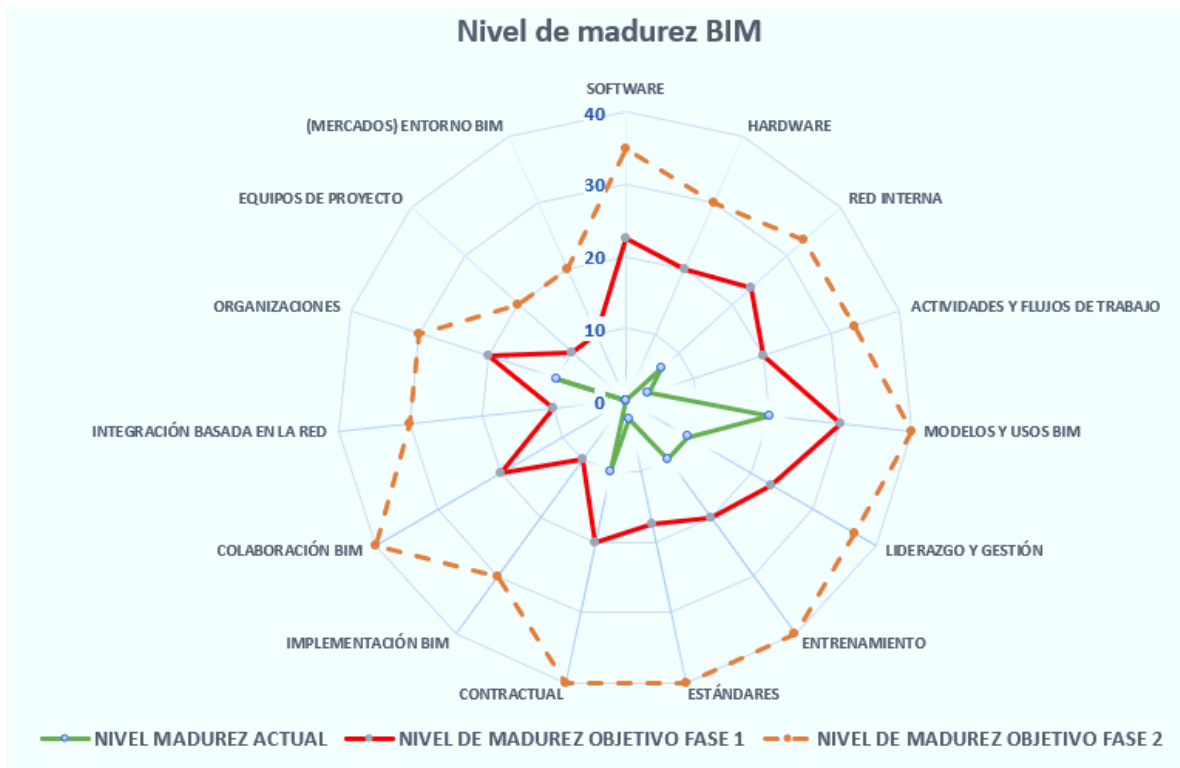


Ilustración 10: Gráfico resumen nivel de madurez

Fuente: Elaboración propia

Como resultado general, el grado de madurez actual en la organización se definió como **nivel de madurez “a” (inicial)**, donde la implementación de BIM se determina por la falta de una estrategia general y una disminución significativa de políticas y procesos. Las herramientas referentes a software BIM no se adoptan de manera sistemática y sin las previas investigaciones adecuadas.

Si bien hubo resultados que superaron el nivel cero (0) catalogado para este nivel de madurez en la primera medición, se optó por dejar el puntaje más desfavorable de calificación y asumir ese nivel como nivel de madurez, tanto para el cálculo del nivel actual (año 2022) como

para los años 2023 (fase 1) y 2024 (fase 2). Posteriormente se realizarán los comparativos con dichas metas.

La estrategia de implementación BIM va de la mano con planes de acción detallados y una política de seguimiento y control. Por ello, con el resultado obtenido (nivel de madurez inicial), se presentan los objetivos trazados después del diagnóstico y definidos para alcanzar los niveles de madurez esperados a 2025 (fase 1) y posteriores (fase 2).

**a) Enfoque del nivel de madurez Fase 1:**

- Poner en funcionamiento y hacer control sobre las definiciones realizadas en temas de especificaciones BIM (EIR, BEP) en los pilotos.
- Realizar seguimiento y control al plan de implementación BIM.
- Desarrollar el manual BIM y articularlo con la gestión de proyectos.
- Iniciar gestión del cambio interno
- Recopilar lecciones aprendidas.
- Con el instrumento desarrollado, se hará seguimiento anual y como meta a lograr en 3 años.

**b) Enfoque del nivel de madurez Fase 2:**

- Aplicar lecciones aprendidas y actividades de mejora continua.
- Fortalecer gestión del cambio y relacionamiento con contratistas.
- BIM como nuevo negocio especializado en sistemas férreos y diferenciador competitivo para la Empresa.

Después de realizado el ejercicio cuantitativo al evaluar cada uno de los aspectos considerados anteriormente, se presenta en la siguiente tabla, una matriz con los resultados esperados, incluyendo indicador, área impactada, responsable y plazo:

CRITERIO	INDICADOR o ENTREGABLE DE CUMPLIMIENTO	ÁREA DE LA EMPRESA IMPACTADA	RESPONSABLE	PLAZO
<b>MADUREZ BIM</b>				
<u>TECNOLOGÍA</u>				
SOFTWARE				
<b>ELECCIÓN DEL SOFTWARE</b>	Manual BIM: Elaborar un anexo donde se especifique el software disponible en la empresa y sus usos generales y particulares aplicados a las necesidades del metro. También se profundizará en cómo debe hacerse y bajo qué criterios, según las buenas prácticas.	TI (Tecnología de Información) y Gerencia de Planeación (Ejecución de proyectos-PMO)	Profesional 1 TI Profesional 1 Ejecución de Proyectos Profesional 1 PMO-BIM	Primer semestre de 2025
<b>USOS MODELOS 3D</b>	Manual BIM: Elaborar especificaciones generales a de talla para proyectos, donde se consigne la estructura y forma de uso de los modelos ya sea para la generación de entregables o para enlace con otras aplicaciones especializadas, por ejemplo, análisis de ingeniería.	Gerencia de Planeación (Ejecución de proyectos-PMO)	Profesional 1 Ejecución de Proyectos Profesional 1 PMO-BIM	Primer semestre de 2025
<b>ALMACENAMIENTO E INTERCAMBIO INFORMACIÓN</b>	Manual BIM: Elaborar la guía de gestión de la información donde se detallarán todos los aspectos relacionados, involucrando los lineamientos a nivel de CDEs que solicita la norma ISO19650.	Gerencia de Planeación (Ejecución de proyectos-PMO)	Profesional 1 Ejecución de Proyectos Profesional 1 PMO-BIM Profesional 1 Administración Documental	Primer semestre de 2025
<b>FLUJOS DE INFORMACIÓN (Formatos open &amp; closed BIM)</b>	Manual BIM: Elaborar anexo detallado EIR (Lineamientos y especificaciones BIM) que se genere para proyectos, basados en lo realizado para el proyecto piloto M80, se incluirá un apartado donde se profundice más sobre el uso y control de los formatos interoperables y	Gerencia de Planeación (Ejecución de proyectos-PMO)	Profesional 1 Ejecución de Proyectos Profesional 1 PMO-BIM	Primer semestre de 2025

CRITERIO	INDICADOR o ENTREGABLE DE CUMPLIMIENTO	ÁREA DE LA EMPRESA IMPACTADA	RESPONSABLE	PLAZO
	flujos de trabajo ya sean Open BIM o Closed BIM.			
<b>HARDWARE</b>				
<b>ESPECIFICACIÓN Y GESTIÓN</b>	Manual BIM: Elaborar un anexo que contenga los criterios de selección de hardware, para un buen desempeño de los aplicativos CADD/BIM.	TI (Tecnología de Información)	Profesional 1 TI Profesional 1 PMO-BIM	Primer semestre de 2025
<b>INVERSIÓN PLANIFICADA HARDWARE</b>	Socializar con TI los criterios que deberán ser tenidos en cuenta para la gestión del hardware que soportará los aplicativos CADD/BIM. Dicha información se consignará en un anexo del manual BIM y se actualizará periódicamente.	TI (Tecnología de Información)	Profesional 1 TI Profesional 1 PMO-BIM	Primer semestre de 2025
<b>RED INTERNA</b>				
<b>REDES INTERNAS (Soluciones Aplicativos para trabajo colaborativo)</b>	Creación de un CDE de tipo nube, Autodesk Docs para para compartir información BIM a nivel interno e interactuar con los demás actores del piloto Metro de la 8o. con la infraestructura de red actual y cuadro de mandos en el CDE BIM, para visualizar el estado del proyecto.	TI (Tecnología de Información)	Profesional 1 TI Profesional 1 PMO-BIM	Primer semestre de 2025
<b>INTERCAMBIO DE INFORMACION (Grado de adopción en la Empresa)</b>		TI (Tecnología de Información)	Profesional 1 TI Profesional 1 PMO-BIM	Primer semestre de 2025
<b>CONEXIÓN (Infraestructura de red)</b>		TI (Tecnología de Información)	Profesional 1 TI Profesional 1 PMO-BIM	Primer semestre de 2025
<b>PROCESOS</b>				
<b>ACTIVIDADES Y FLUJOS DE TRABAJO</b>				Primer semestre de 2025
<b>ROLES BIM</b>	Establecer los roles BIM en el manual BIM, además se incluirán en las especificaciones BIM para proyectos en los que se aplique la metodología.	Gerencia de Planeación (PMO) Y Talento Humano	Profesional 1 Talento Humano Profesional 1 PMO-BIM	Primer semestre de 2025
<b>TRANSVERSALIDAD (Adopción BIM en los equipos de Trabajo)</b>		Gerencia de Planeación (PMO) Y Talento Humano	Profesional 1 Talento Humano Profesional 1 PMO-BIM	Primer semestre de 2025
<b>RESULTADOS Y PRODUCTIVIDAD (Capacidad de desarrollar roles BIM)</b>		Gerencia de Planeación (PMO) Y Talento Humano	Profesional 1 Talento Humano Profesional 1 PMO-BIM	Primer semestre de 2025
<b>MODELOS Y USOS BIM</b>				

CRITERIO	INDICADOR o ENTREGABLE DE CUMPLIMIENTO	ÁREA DE LA EMPRESA IMPACTADA	RESPONSABLE	PLAZO
<b>MODELOS Y USOS BIM (Grado adopción de los niveles de desarrollo BIM)</b>	Elaborar tabla de seguimiento a la aplicación de los usos, LODs, de los modelos generados para el proyecto M8o. Esto a su vez enriquecerá el manual BIM donde se abordará más en detalle estos aspectos.	Gerencia de Planeación (PMO)	Profesional 1 PMO-BIM	Primer semestre de 2025
<b>LIDERAZGO Y GESTIÓN</b>				
<b>VISIÓN ORGANIZACIONAL</b>	La implementación BIM con entregables definidos se le hará seguimiento y control metodológico desde la PMO, lo cual quedará consignado periódicamente en el informe de seguimiento del proyecto.	Gerencia de Planeación (PMO-Planeación Estratégica)	Profesional 1 PMO-BIM Profesional 1 Planeación Estratégica	Primer semestre de 2025
<b>ESTRATEGIA DE IMPLEMENTACIÓN</b>		Gerencia de Planeación (PMO-Planeación Estratégica)	Profesional 1 PMO-BIM Profesional 1 Planeación Estratégica	Primer semestre de 2025
<b>OPORTUNIDADES DE NEGOCIO (BIM+Innovación)</b>		Gerencia de Planeación (PMO-Planeación Estratégica y Desarrollo de negocios)	Profesional 1 PMO-BIM Profesional 1 IDI Profesional 1 Planeación Estratégica	Posterior a 2025
<b>POLÍTICAS</b>				
<b>ENTRENAMIENTO</b>				
<b>REQUISITOS DE ENTRENAMIENTO</b>	Elaborar anexo al manual BIM sobre competencias mínimas BIM deberán tener los profesionales que interactúen con proyectos que usen la metodología.	Gerencia de Planeación (PMO) Y Talento Humano	Profesional 1 Talento Humano Profesional 1 PMO-BIM	Primer semestre de 2025
<b>METODOLOGÍA DE ENTRENAMIENTO</b>		Gerencia de Planeación (PMO) Y Talento Humano	Profesional 1 Talento Humano Profesional 1 PMO-BIM	Primer semestre de 2025
<b>ESTÁNDARES</b>				
<b>POLÍTICAS Y PROTOCOLOS</b>	Elaborar anexo en el manual BIM sobre lineamientos relacionados con modelado, flujos de trabajo, representaciones, coordinación y calidad BIM, etc., que serán a su vez refinados con los entregados por el proyecto M8o.	Gerencia de Planeación (PMO-Planeación Estratégica)	Profesional 1 PMO-BIM Profesional 1 Planeación Estratégica	Primer semestre de 2025
<b>ESTÁNDARES DE MODELADO</b>		Gerencia de Planeación (PMO-Planeación Estratégica)	Profesional 1 PMO-BIM Profesional 1 Planeación Estratégica	Primer semestre de 2025
<b>PLAN DE CALIDAD (En la Metodología BIM)</b>		Gerencia de Planeación (PMO-Planeación Estratégica)	Profesional 1 PMO-BIM Profesional 1 Planeación Estratégica	Primer semestre de 2025

CRITERIO	INDICADOR o ENTREGABLE DE CUMPLIMIENTO	ÁREA DE LA EMPRESA IMPACTADA	RESPONSABLE	PLAZO
<b>INDICADORES</b>	Establecer en el manual BIM, indicadores de seguimiento basados en la Guía BIM Kit Camacol	Gerencia de Planeación (PMO-Planeación Estratégica)	Profesional 1 PMO-BIM Profesional 1 Planeación Estratégica	Primer semestre de 2025
<b>CONTRACTUAL</b>				
<b>CONTRACTUAL</b>	Elaborar BEPs de oferta en las licitaciones donde la componente BIM tenga puntaje Se implementarán estos aspectos en la sección contractual de las especificaciones BIM para proyectos.	Gerencia de Planeación (PMO) y área de Contratación	Profesional 1 PMO-BIM Profesional 1 Contratación	Primer semestre de 2025
<b>CAPACIDAD BIM</b>				
(MODELO BASADO EN OBJETOS) ESTATUS DE IMPLEMENTACIÓN BIM				
(COLABORACIÓN BASADA EN EL MODELO) COLABORACIÓN BIM				
<b>PARTICIPACIÓN (Grado de adopción del trabajo colaborativo entre actores del proyecto)</b>	Plan de capacitaciones sobre la implementación metodología	Gerencia de Planeación (Planeación Estratégica-Ejecución de proyectos-IDI)	Profesional 1 PMO-BIM	Primer semestre de 2025
<b>TRABAJO COLABORATIVO BIM (Grado de respeto de los lineamientos definidos para el trabajo colaborativo)</b>		Gestión Documental	Profesional 1 PMO-BIM	Primer semestre de 2025
<b>INTEGRACIÓN BASADA EN LA RED</b>				
<b>PARTICIPACIÓN DE INTEGRANTES (Grado de participación de los diferentes actores y sus disciplinas con sus modelos en uno solo integrado)</b>	Elaborar anexo de coordinación en el manual BIM, con directrices para la integración, revisión, gestión de modelos multidisciplinares.	Gerencia de Planeación (PMO)	Profesional 1 PMO-BIM	Primer semestre de 2025
<b>INTEGRACIÓN DE LA INFORMACIÓN (Grado de adopción de protocolos definidos para la integración de modelos con mejora continua.)</b>		Gerencia de Planeación (PMO)	Profesional 1 PMO-BIM	Primer semestre de 2025
<b>ESTRUCTURA DE TRABAJO</b>				
<b>ORGANIZACIONES</b>				
<b>ORGANIZACIONES (Liderazgo BIM)</b>	Plan de capacitaciones continuo sobre la implementación metodología	Gerencia de Planeación (Planeación Estratégica-Ejecución de proyectos-IDI)	Profesional 1 PMO-BIM y profesionales PMO de apoyo	Primer semestre de 2025



CRITERIO	INDICADOR o ENTREGABLE DE CUMPLIMIENTO	ÁREA DE LA EMPRESA IMPACTADA	RESPONSABLE	PLAZO
		Gerencia de desarrollo de negocios Gerencia de Operación y Mantenimiento Área de Contratación Gestión Documental		
<b>EQUIPOS DE PROYECTO</b>				
<b>EQUIPOS DE PROYECTO (Capacidad de la empresa y sus proveedores de interactuar en ambiente colaborativo en diferentes contratos, ejemplo M8o)</b>	Plan de socialización con proveedores para intercambio de información.	Gerencia de Planeación (PMO)	Profesional 1 PMO-BIM	Primer semestre de 2025
<b>(MERCADOS) ENTORNO BIM</b>				
<b>PROVEEDORES OBJETOS BIM (Uso o su promoción por parte de EMM de objetos BIM desarrollados por proveedores de materiales)</b>	Registro en el manual BIM de un apartado sobre la importancia del uso de objetos BIM y socialización con proveedores para intercambio de información.	Gerencia de Planeación (PMO)	Profesional 1 PMO-BIM Profesional 1 Contratación	Primer semestre de 2025

Tabla 30. Matriz resultados esperados Madurez BIM

Fuente: Elaboración propia

## **6.2. Plan de ejecución BIM (P.E.B) respecto a los alcances de los contratos**

### **BIM y usos BIM que se darán en el proyecto**

Antes de iniciar con el desarrollo del presente resultado, se presenta un contexto del proyecto piloto Metro de la 80 objeto del caso de estudio, indicando sus antecedentes y características principales.

#### **6.2.1. Proyecto METRO DE LA 80**

El Metro Ligero de la 80 fue identificado dentro del Plan Maestro del Metro de Medellín como uno de los proyectos de transporte de pasajeros de mediana capacidad para ser implementado a corto plazo bajo la tecnología de Metro Ligero.

Por ello, se definió y viabilizó esta opción para el corredor de la Avenida 80 una red básica de transporte público masivo y de mediana capacidad con el objetivo de que pudiera ser articulada con el metro y con los otros modos y medios de transporte existentes. Dado lo anterior, en el 2009 se realizaron estudios de prefactibilidad técnica y financiera sobre el corredor de la Av. 80, brindando información a la ciudad sobre la viabilidad del proyecto. Estos estudios incluían el estudio de selección tecnológica y cuya conclusión fue que el sistema a implementar era un sistema ferroviario urbano sobre rieles tipo Metro Ligero. Posteriormente, entre los años 2010 y 2012, se adelantaron los diseños de ingeniería de detalle a nivel de factibilidad; a su vez, en 2015, se realizó la actualización de la matriz multicriterio de selección tecnológica ratificando la selección del sistema metro ligero (Ramírez et al., 2020). CONPES 4003.

En 2016 la empresa Metro de Medellín suscribió el contrato con el objeto de “Diseñar el esquema de transacción; actualizar los estudios del componente de tránsito y transporte; optimizar y actualizar los estudios y diseños de ingeniería Fase II del proyecto Corredor de Transporte de la 80”. Dicho contrato se ejecutó con asesoría, por parte de la FDN (Financiera de Desarrollo Nacional) y de la empresa ARUP Colombia S.A.S., considerando las nuevas exigencias establecidas en el Acuerdo 48 de 2014, POT de Medellín, por lo que se planteó el ajuste del trazado de un Metro Ligerero sobre el corredor de la Avenida 80 (Ramírez et al., 2020). CONPES 4003.

Posteriormente para el año 2019 la administración municipal manifiesta que disponía de los recursos completos por lo que, tanto para su ejecución total, como para la ejecución del Tramo I o primera fase, contemplada en el Plan de Desarrollo, se requería del aporte de recursos de la Nación, con la que se esperaba contar con fundamento en la denominada Ley de Metros, Ley 310 de 1996.

Dada la situación anterior, se llevaron a cabo todos los trámites correspondientes ante la nación para alcanzar la aprobación del proyecto, seguidamente y cumplidos los requisitos dados por el gobierno nacional, el CONPES (Consejo Nacional de Política Económica y Social) en virtud de “lo establecido en la Ley 819 de 2003, Decreto 1068 de 2015 y Ley 1955 de 2019, emitió el documento CONPES 4003 de 2020 mediante el cual se declaró de importancia estratégica del proyecto del Metro Ligerero de la 80 en Medellín”(Ramírez et al., 2020). A su vez, el Concejo Municipal de Medellín, mediante Acuerdo No. 07 del 25 de septiembre de 2020, corregido por Acuerdo Municipal 11 de 2020, por medio del cual autorizó al alcalde de Medellín para comprometer vigencias futuras ordinarias (o compromisos económicos posteriores) y con ello, aprobar los desembolsos a realizar por parte del Municipio entre los años 2021 y 2034. Una vez aprobadas las vigencias futuras del Municipio y de la Nación, se cumplieron todas las condiciones para que las partes celebren un Convenio de Cofinanciación con el que se garantizan sus aportes

para la ejecución del proyecto Metro de la 80. Producto de ello, el convenio fue celebrado el día 30 de noviembre de 2020 y posterior a ello entre 2021 y 2022 y se continuó con las etapas de estructuración legal, técnica y económica, además de las etapas precontractuales para definir los ejecutores de los siguientes componentes:

- Contrato de Gestión Social y Comunicacional del Proyecto.
- Contrato de Actualización de Estudio de Impacto Ambiental y Social.
- Contrato de Gestión predial.
- Contrato de Diseño de redes principales externas para un tramo priorizado (Caribe-San Germán).
- Contrato de Auditoría financiera externa.
- Contrato de Operación de crédito.
- Contrato de Conexión a subestación de energía
- Contrato Principal bajo la modalidad llave en mano de obra pública.
- Contrato de Interventoría.

#### **6.2.1.1. Características del proyecto**

El Corredor refiere un trazado de 13.5 kilómetros, desde la estación Caribe (Terminal del Norte) hacia el sector de la facultad de Minas tomando la ruta por la Calle 65 y transversal 73 y tomando posteriormente la Avenida 80-82 hasta el sector de la Aguacatala en el sur de la ciudad de Medellín y comprende los siguientes tramos:

- Tramo 1: Estación Caribe (que se encuentra sobre la línea A del metro) y estación Floresta (ubicada en la línea B del metro)

- Tramo 2: Estación Floresta y la Calle 30 (sobre las líneas 1 y 2 del sistema Metroplús)
- Tramo 3: Calle 30 y Estación Aguacatala (ubicada sobre la línea A del metro)



Ilustración 11: Render Proyecto Metro de la 80

*Fuente: Metro de Medellín*

Como se puede ver la siguiente ilustración, sobre la longitud de la línea (color rojo) contará con 17 estaciones o paradas y su implantación en todo el recorrido será a nivel, a excepción de la parada Robledo que será semisoterrada y tres viaductos a desnivel: Caribe, Av. Guayabal y Calle 12 sur Aguacatala.

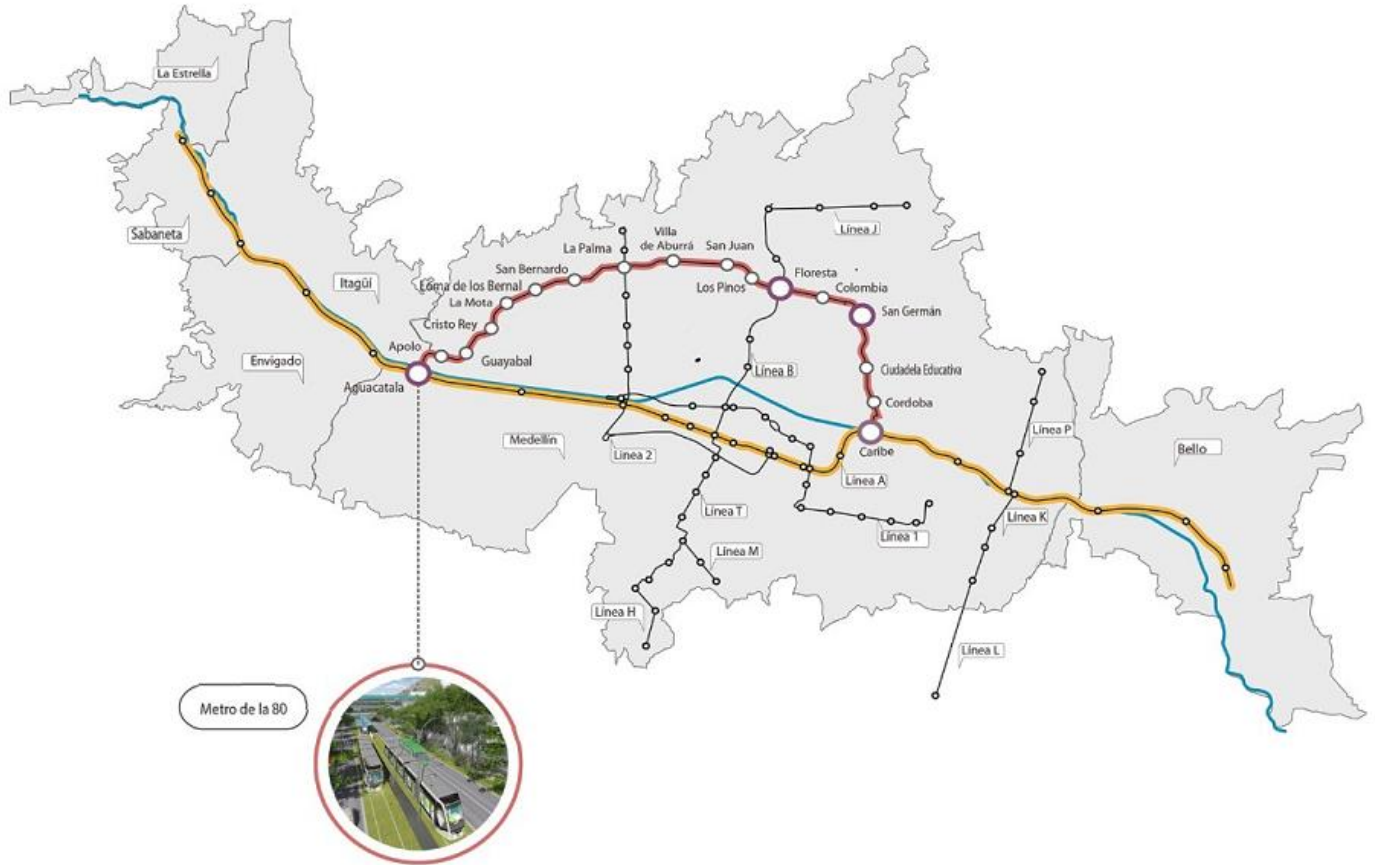


Ilustración 12: Trazado y paradas Proyecto Metro de la 80

*Fuente: Metro de Medellín*

Se ha considerado que la conducción y señalización para esta línea es del tipo (marcha a la vista). No obstante, se dispondrá de señalización ferroviaria. Se limita la velocidad máxima a 60 km/h en zonas urbanas protegidas y a 70 km/h en las zonas en la que la línea discurre por vía segregada. La velocidad máxima considerada en zonas con cruces viales es de 40 km/h.



Ilustración 13: Render Proyecto Metro de la 80

*Fuente: Metro de Medellín*

En este proyecto se diseñarán y construirán estructuras, redes de acueducto, alcantarillado, gas, redes de energía, redes telefónicas, instalaciones eléctricas de alumbrado y fuerza, sistemas de potencia, sistema de protección contra rayos y sistemas de puesta a tierra, red de voz y datos, redes y sistemas contraincendios, sistemas electromecánicos, superestructura de vía férrea, vías vehiculares de tránsito mixto, estaciones, paradas y urbanismos, compra de material rodante, además de todas los elementos y componentes que se requieran para el correcto funcionamiento del Sistema del Metro de la 80 y su área de influencia, adicional de la construcción y puesta en marcha del proyecto.

Posterior a la anterior descripción sobre los antecedentes del proyecto Metro de la Av. 8o, se presenta a continuación los resultados obtenidos a partir de las herramientas metodológicas planteadas en el capítulo 4 del presente trabajo de investigación.

### 6.2.2. Plan de ejecución BIM (P.E.B)

El Plan de Ejecución BIM, define cómo se llevarán a cabo los aspectos de modelado de información de un proyecto, estableciendo los roles y responsabilidades y estándares a aplicar, deberá mostrar cómo se cumplirán los requerimientos indicados. La estructura del PEB deberá contener información básica del Proyecto, objetivos, usos y competencias del equipo, empresas participantes con sus roles, entregables, estrategia de colaboración y estándares con sus respectivas convenciones asociadas (Soto et al., 2019). Se propone para el presente trabajo de investigación que el documento PEB, contenga los siguientes elementos:

Consec.	Código	DESCRIPCIÓN
1		Portada
2	A	Empresas Participantes
3	B	Objetivos y Usos BIM
4	B1	Objetivos de la utilización de BIM en el proyecto
5	B2	Usos BIM (PEB Definitivo)
6	B3	Recursos de los Equipos
7	B3	USO BIM 1-Levantamiento de condiciones existentes
8	B3	USO BIM 2-Estimación de cantidades y costos
9	B3	USO BIM 3-Planificación de fases
10	B3	USO BIM 4-Análisis del cumplimiento del programa espacial (zonificación)
11	B3	USO BIM 5-Análisis de ubicación
12	B3	USO BIM 6-Coordinación 3D
13	B3	USO BIM 7-Diseño de especialidades



<b>Consec.</b>	<b>Código</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>
14	B3	USO BIM 8-Revisión del diseño
15	B3	USO BIM 9-Análisis estructural
16	B3	USO BIM 10-Análisis lumínico
17	B3	USO BIM 11-Análisis energético
18	B3	USO BIM 12-Análisis mecánico
19	B3	USO BIM 13-Otros análisis de ingeniería
20	B3	USO BIM 14-Evaluación de sustentabilidad
21	B3	USO BIM 15-Validación normativa
22	B3	USO BIM 16-Planificación de obra
23	B3	USO BIM 17-Diseño de sistemas constructivos
24	B3	USO BIM 18-Fabricación digital
25	B3	USO BIM 19-Control de obra
26	B3	USO BIM 20-Modelación as-built
27	B3	USO BIM 21-Gestión de activos
28	B3	USO BIM 22-Análisis de sistemas
29	B3	USO BIM 23-Mantenimiento preventivo
30	B3	USO BIM 24-Gestión y seguimiento de espacios
31	B3	USO BIM 25-Planificación y gestión de emergencias
32	C	Entregables BIM y sus Formatos
33	C1	Modelos BIM solicitados y sus formatos (PEB Definitivo)
34	C2	Estado de Avance de Información de Información de los Modelos BIM para cada Entrega
35	C3	Documentos solicitados y sus formatos (PEB Definitivo)
36	D	Estrategia de Colaboración
37	D1	Entorno de Datos Compartidos (CDE)
38	D2	Consolidación de modelos BIM
39	D3	Procedimiento de reuniones (solo PEB definitivo)
40	E	Organización de los modelos BIM
41	E1	Estructuración de los modelos BIM (solo PEB Definitivo)
42	E2	Nombres de archivos de los modelos BIM (solo PEB Definitivo)
43	E3	Códigos y colores por disciplinas y/o sistemas (solo PEB Definitivo)
44	E4	Sistema de clasificación (solo PEB Definitivo)

Tabla 31. Estructura plantillas Plan de Ejecución BIM

Fuente: Elaboración propia

En el ANEXO 2, Plantillas Plan de ejecución BIM (P.E.B) respecto a los alcances de los contratos BIM y usos BIM que se darán en el proyecto, se registran las plantillas del PEB que deberá diligenciar el ejecutor del proyecto con base en la información presentada en la tabla anterior.

### **6.3. Requerimientos para el contratista y la interventoría del proyecto para la fase 3 de diseños y construcción del proyecto en cuanto a la implementación del BIM**

Los proyectos realizados hasta el momento en el Metro de Medellín no fueron desarrollados con la metodología BIM. A partir del proyecto Metro liviano de la 80, esta será incluida y el proyecto se considera el piloto de adopción de la metodología en la empresa, extensible a los demás proyectos futuros. Debido al sistema de contratación de sus proyectos, los documentos contractuales deben incluir también requerimientos BIM. Se pretende de esta forma, mejorar la gestión de proyectos en el Metro de Medellín, con la incorporación de la metodología BIM.

La estructura de requerimientos contractuales propuestos en el trabajo y adoptados por la empresa Metro de Medellín como documento contractual para el contratista en este proyecto tiene los siguientes componentes:

N°	REQUISITO PROPUESTO
1	INTRODUCCIÓN
2	NORMATIVIDAD
3	OBJETIVOS BIM
3,1	Objetivo general
3,2	Objetivos Específicos
4	ALCANCES
4,1	Conceptos base
4,1,1	Usos BIM
4,1,2	Estado de avance de información de los modelos (EAIM) requeridos
4,1,3	Niveles de información (NDI) requeridos
4,1,4	Tipos de información (TDI) requeridos
5	ENTREGABLES BIM
5,1	Plan de ejecución BIM (PEB)
5,2	Modelos BIM
5,2,1	Entidades por modelo BIM
5,2,2	Nivel de información de entidades

N°	REQUISITO PROPUESTO
5,2,3	Parámetros mínimos que deben incluirse en los modelos
5,3	Documentación
6	ENTREGAS Y FORMATOS MODELOS BIM
6,1	Entregas para las etapas de preconstrucción
6,2	Entregas para las etapas de construcción y operación
6,3	Formatos de los entregables
7	TÉRMINOS Y OBLIGACIONES COMPLEMENTARIAS
7,1	Aplicabilidad y propósito
7,2	Gestión de los modelos BIM
7,3	Plan de Ejecución BIM (PEB)
7,4	Derechos de propiedad intelectual de los modelos BIM
7,5	Gestión de metodología

Tabla 32. Estructura términos contractuales contratista del proyecto

Fuente: Elaboración propia

Igualmente, el interventor, encargado de supervisar las labores realizadas por el ejecutor del proyecto y quien actúa en representación de los intereses del cliente (Metro de Medellín), tiene la labor de revisión, control y aprobación de las actividades relacionadas con la implementación de la metodología BIM en el proyecto Metro de la 8o.

N°	TEMA
1	INTRODUCCIÓN
2	OBJETIVO GENERAL
3	ENTREGABLES BIM
3,1	PEB (Plan de Ejecución BIM)
3,2	Modelos BIM
3,3	Parámetros mínimos que deben incluirse en los modelos
3,4	Entregas y formatos modelos BIM
4	Documentación
5	Obligaciones complementarias

Tabla 33. Estructura términos contractuales interventoría del proyecto

Fuente: Elaboración propia

En el ANEXO 3 (Requerimientos BIM para el contratista y la interventoría del proyecto para la fase 3 de diseños y construcción del proyecto en cuanto a la implementación del BIM), se describe detalladamente cada uno de los componentes citados tanto para el ejecutor del proyecto (contratista) como para la interventoría.

#### **6.4.Propuesta de estructura de implementación BIM en la empresa Metro de Medellín.**

El Metro de Medellín pretende plantear una iniciativa para la mejora en la gestión de los proyectos. Para ello, en este trabajo se presenta una propuesta de implementación de la metodología BIM en el proyecto piloto Metro liviano de la 80, que servirá como referente de implementación para los próximos proyectos y que se espera, mejore la gestión de proyectos en la empresa Metro de Medellín.

Por ello, el Metro de Medellín adopta las recomendaciones establecidas en el documento hoja de ruta para la implementación BIM (BIM FORUM COLOMBIA 2020), teniendo en cuenta el diagnóstico de madurez realizado en la empresa y que determinó un estado de madurez en etapa INICIAL.

En este sentido se pretende establecer una estructura con 5 (cinco) etapas para la implementación de la metodología BIM en el Metro: INICIO, PLANEACIÓN, EJECUCIÓN, MEDICION Y SEGUIMIENTO, RETROALIMENTACIÓN, pensadas en un orden cronológico desde la idea de BIM hasta desarrollar los procesos para la mejora continua. Su orden puede ser interpretado según las necesidades de implementación, tal y como lo recomienda BIM Forum Camacol (CAMACOL, 2018).

<b>ETAPA</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>
INICIO	Corresponde a las actividades de preparación inicial antes de anunciar una implementación en la organización. Son tareas como estudiar y definir responsables, consultar documentos técnicos de soporte y realizar un diagnóstico inicial. Estas actividades preparan el terreno para ejecutar las siguientes etapas.

ETAPA	DESCRIPCIÓN
PLANEACIÓN	Es la etapa en donde se delimita el plan de implementación. Aquí se elegirá el alcance y la estrategia según los objetivos de la organización para poder establecer objetivos y responsabilidades puntuales a asignar dentro del equipo.
MEDICIÓN Y SEGUIMIENTO	La etapa describe prácticas útiles durante toda la implementación para medir su eficacia, siempre buscando identificar oportunidades de mejora e incentivar la participación de más personas en la organización.
RETROALIMENTACIÓN	Es la etapa final en donde se procesan las mediciones y comentarios sobre procedimientos y entregables. El objetivo es mejorar continuamente en un proceso iterativo que sugiere volver a visitar toda la hoja de ruta buscando rectificar la estrategia

Tabla 34. Etapas para la implementación de la metodología BIM

Fuente: Elaboración propia a partir de (CAMACOL, 2018)

#### **6.4.1. Etapa 1: INICIO**

##### **a) Responsable de proceso y patrocinador de nivel estratégico de la dirección del metro**

La estructura administrativa expresa las relaciones que guardan entre si las áreas que la integran, es decir, los roles y responsabilidades, y evidencia la línea de autoridad y comunicación dentro de la Empresa. Según las recomendaciones de BIM Forum Camacol se propone para este trabajo la figura de patrocinador al (Coordinador de la Oficina de Proyectos PMO adscrita a la Gerencia de Planeación), con habilidades de comunicación y sustentación de ideas a nivel gerencial y con capacidades para obtener apoyos y lograr cambio empresarial. En cuanto al rol de

promotor, se propone al profesional 1 PMO-BIM con habilidades para liderar técnicamente el proceso de implementación al interior de la Empresa y con capacidades de comunicación y estrategia.

De acuerdo con el organigrama de la Empresa Metro de Medellín, se presenta a continuación la ubicación de la Gerencia de Planeación, donde se encuentra adscrita la Oficina de Proyectos PMO. También se presenta en las líneas resaltadas, las áreas propuestas para iniciar con la implementación.

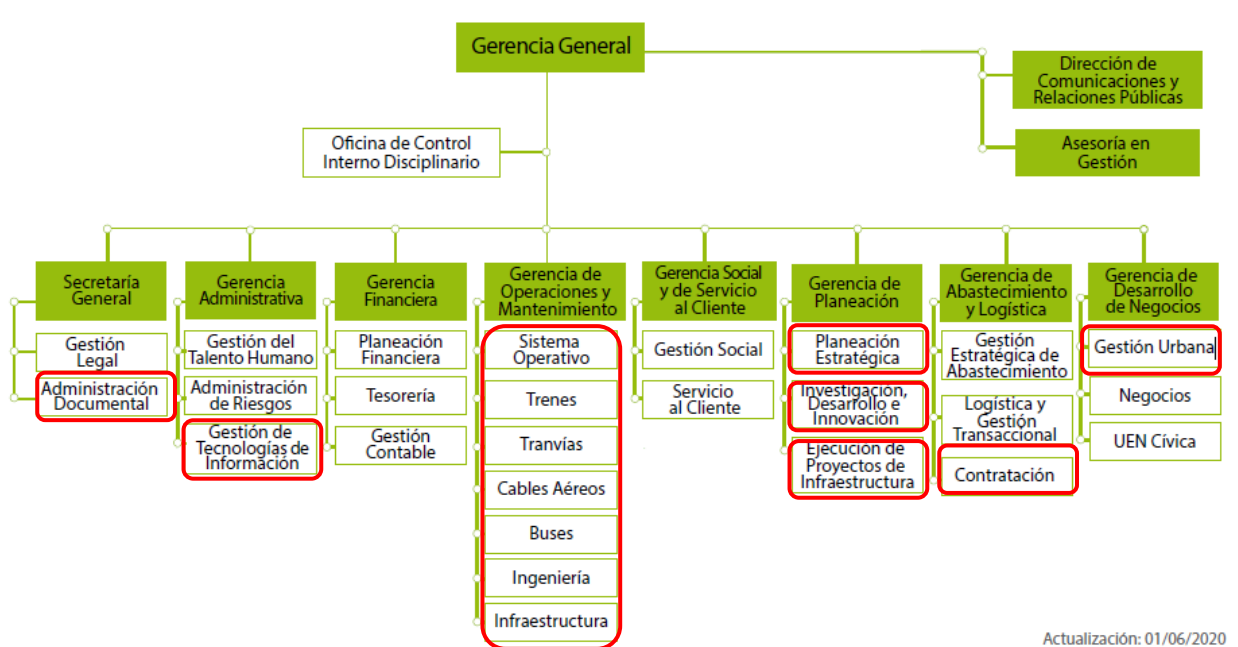


Ilustración 14: Organigrama Metro de Medellín (áreas propuestas a impactar con BIM)

Fuente: Metro de Medellín



**b) Diagnóstico del metro**

Tal y como se indicó en el numeral 6.1 del presente documento, se realizó la primera fase de la matriz de nivel de madurez con la herramienta RUTA BIM cuyos resultados arrojaron un nivel de madurez INICIAL. Se plantea realizar nuevamente el autodiagnóstico en 2025 y compararlo con la proyección determinada por la empresa. Sin embargo, a finales de 2023 y 2024, se propone realizar unos diagnósticos de chequeo previos a la proyección establecida a 2025.

**c) Documentos técnicos de soporte y estándares internacionales metodología BIM**

Los documentos de referencia que recomiendan en el presente trabajo de investigación y que pueden servir de referencia para el proceso de implementación del Metro de Medellín en el horizonte de tiempo establecido a 2025, serán:

- Para políticas, estándares y procesos, los documentos del BIM Forum Colombia CAMACOL con el BIM KIT 1 y 2 complementado con el referente de PLAN BIM Chile para proyectos públicos.
- Para el componente de gestión del cambio, referentes como los modelos desarrollados por de Kurt Lewin y John Paul Kotter.
- Para el componente de Tecnología, se recomienda continuar con el licenciamiento de software que tiene actualmente la Empresa Metro con la marca AUTODESK, el cual ofrece diferentes softwares BIM. Se recomienda además aumentar las licencias necesarias a medida que el proceso de implementación evolucione en los proyectos de la Empresa.

### **6.4.2. Etapa 2: PLANEACIÓN**

#### **a) Alineación de la metodología BIM a la misión y visión del Metro**

*El Metro de Medellín cuenta como un **Propósito superior** de Generar calidad de vida para las personas e integrar y transformar territorios, contribuyendo con la sostenibilidad de la región” y una **MEGA de Ser a 2025** una Empresa innovadora con un crecimiento eficiente, articuladora de la movilidad como servicio, para conectar 1,3 millones de viajeros al día y con una participación de ingresos por negocios asociados del 15%. (Metro de Medellín, 2022a).*

En este sentido y de acuerdo con el mapa Estratégico de la Empresa, el cual es la representación de forma gráfica mediante la metodología de Cuadro de Mando Integral que relaciona mediante causa efecto los objetivos estratégicos, las perspectivas, y los objetivos de Desarrollo Sostenible, se pretende que la implementación de la metodología BIM impacte las perspectivas PROCESOS E INNOVACIÓN y CIUDAD Y TERRITORIO y así estar en línea con los objetivos estratégicos.



Ilustración 15: Mapa estratégico Metro de Medellín

Fuente: Metro de Medellín

A partir de este direccionamiento estratégico, la implementación y apropiación de la metodología BIM tiene un horizonte proyectado al 2025, donde se pretende que sea transversal a todos los procesos internos y externos para el desarrollo de los proyectos de la organización.

**b) Objetivos de implementación BIM**

Para alinear la metodología BIM con el direccionamiento estratégico de la Entidad es necesario establecer una serie de objetivos a corto mediano y largo plazo.

1. Objetivo General BIM METRO: Continuar con el mejoramiento en la gestión de proyectos de la Entidad mediante la aplicación de la metodología BIM en el ciclo de vida de los proyectos.

### 1.1. Objetivos específicos a corto plazo BIM METRO - 2022

- Matricular el proyecto de implementación de BIM en la PMO de la Empresa.
- Elaborar el primer autodiagnóstico BIM al interior de la Empresa.
- Estructurar el documento de estándar de implementación BIM
- Realizar el proceso de gestión de inscripción de la empresa Metro a la mesa BIM Forum CAMACOL
- Realizar los pilotos BIM: Diseño de traslado de redes tramo 1 Metro de la 80) con EPM, modelación de 3 estaciones y parada típica en LOD 200 con la EDU y especificaciones técnicas para la factibilidad de los 5 nuevos sistemas de cables.
- Ejecución de capacitaciones al interior de la Empresa en fundamentos, usos y herramientas BIM.

### 1.2. Objetivos específicos a mediano plazo BIM METRO – 2023

- Continuar con el desarrollo del documento de estándar de implementación BIM
- Desarrollar las plantillas para contratación de los demás proyectos de la Gerencia de planeación.
- Continuar con las pruebas piloto de implementación de la metodología BIM en los demás proyectos de la Gerencia de Planeación.
- Realizar el autodiagnóstico de chequeo BIM al interior de la Empresa (previo a la proyección establecida a 2025)
- Continuar con la ejecución de capacitaciones de la Metodología BIM.
- Realizar el seguimiento del piloto de implementación en el proyecto Metro de la 80.

### 1.3. Objetivos específicos a largo plazo BIM METRO – 2024

- Desarrollar a detalle el estándar de implementación BIM (aplicación y publicación en el sistema de gestión integral) e incorporación del documento DR 1242 Gestión de Proyectos para cumplimiento por las demás áreas de las Empresa.
- Ajustar plantillas para contratación de los proyectos de la Gerencia de planeación.
- Continuar con las pruebas piloto de implementación de la metodología BIM en los demás proyectos de la Gerencia de Planeación.
- Continuar con la ejecución de capacitaciones de la Metodología BIM.
- Realizar el autodiagnóstico de chequeo BIM al interior de la Empresa (previo a la proyección establecida a 2025)
- Continuar con el seguimiento del piloto de implementación en el proyecto Metro de la 8o.

## 2. Metas de la implementación BIM en el METRO

Se proponen las siguientes metas para los próximos años:

- Para el año 2023: Incorporar aplicabilidad de la Metodología BIM hasta el 20% de los proyectos de la gerencia de planeación.
- Para el año 2024: Incorporar aplicabilidad de la Metodología BIM entre el 20% y el 40% de los proyectos de la gerencia de planeación.
- Para el año 2025: Incorporar aplicabilidad de la Metodología BIM entre el 40% y el 60% de los proyectos de la gerencia de planeación.
- Para el año 2026: Incorporar aplicabilidad de la Metodología BIM entre el 60% y el 100% de los proyectos de la gerencia de planeación.

Se describe a continuación el horizonte previsto con las actividades generales para la implementación de la metodología BIM al interior de la Empresa mediante la siguiente línea de tiempo al año 2025 previo a la estrategia país a 2026:

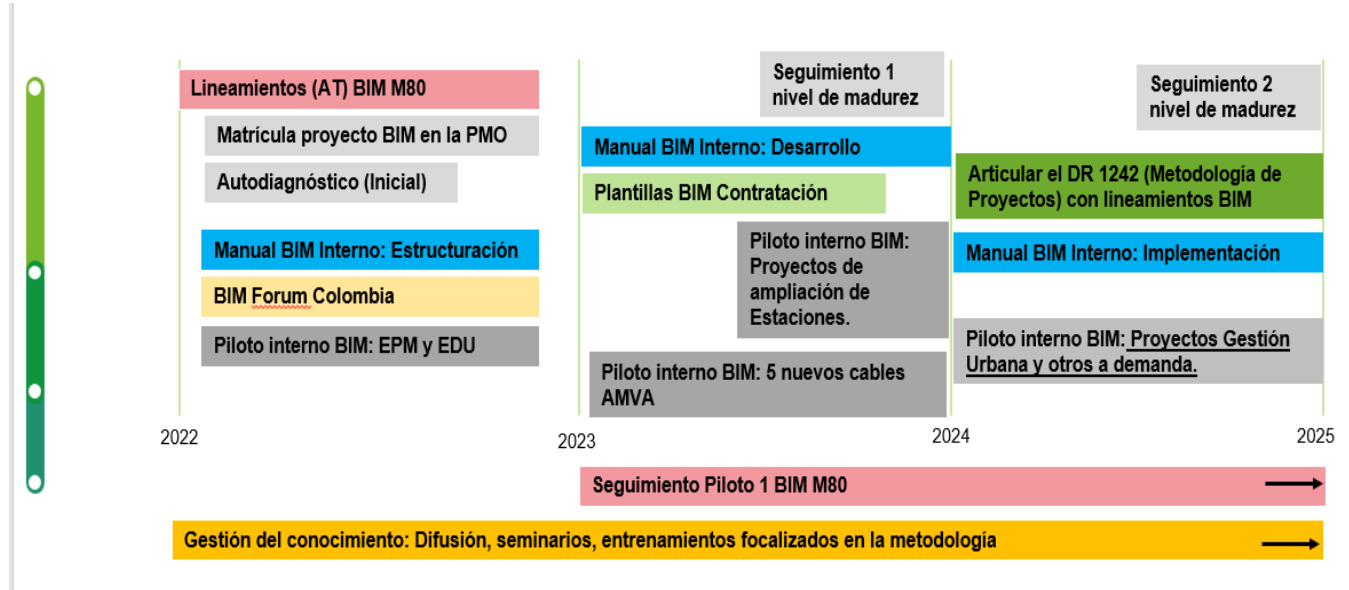


Ilustración 16: Línea de tiempo horizonte de implementación BIM

Fuente: Elaboración propia

### 3. Priorización de procesos METRO para la implementación del BIM

Con relación a la estructura de procesos de la Empresa, es necesario entender el Mapa de Procesos que se vincula con la Gestión de Proyectos de la Empresa. El mapa de procesos es la representación de los procesos de primer nivel de la Empresa, los cuales se relacionan como macroprocesos. Estos muestran cómo se relacionan los de tipo estratégico, de soporte, misionales, y de verificación para lograr el cumplimiento del direccionamiento estratégico.



Ilustración 17: Mapa de macroprocesos Metro de Medellín

Fuente: Metro de Medellín

De estos 11 macroprocesos descritos en el esquema anterior se desprenden una serie de subprocesos relacionados a continuación:



Ilustración 18: Mapa de procesos Metro de Medellín

Fuente: Metro de Medellín

Uno de los 14 procesos que se desprenden del macroproceso Gestión de la Estrategia del crecimiento y la Innovación, corresponde al proceso de **GESTIÓN DE PROYECTOS** y cuya ficha se indicará en la Etapa 3 EJECUCIÓN (Reingeniería de procesos-priorización). Seguidamente en la Propuesta y Prototipado, se incluirá la propuesta de procesos BIM.



Uno de los objetivos con el que se pretende implementar la metodología BIM es lograr la articulación y/o mejoramiento de la gestión de proyectos en la Empresa, incorporando la documentación y flujos necesarios a mediano plazo en las fases del proyecto, desde el inicio hasta el cierre con el horizonte planteado a 2025.

#### 4. Gestión del cambio

La gestión del cambio busca la transformación de los procesos internos de la Empresa mediante una correcta implementación para que los grupos de interés asimilen los cambios y se minimice la resistencia a los mismos.

La Empresa deberá implementar un plan de gestión del cambio con el fin de emprender acciones que conlleven a:

- Implementar paulatinamente la metodología para garantizar la asimilación en los grupos de trabajo.
- Realizar un plan de formación de herramientas BIM.
- Visualizar permanentemente la estructura del equipo BIM con sus propios roles en el entorno de la Empresa
- Enfatizar en los beneficios y bondades de la implementación de la metodología frente al proceso actual de Gestión de Proyectos de la organización.

#### **c) Definición de roles BIM en el Metro**

Se deberá conformar una estructura de personas con roles (o descripción de funciones) especializados para la implementación de la metodología quienes se encargarán de el planteamiento y desarrollo de la estrategia, además deberán contar con habilidades tanto técnicas

como blandas al servicio de los grupos de trabajo y que permitan una correcta gestión del cambio en la organización.

La estructura básica que se propone en este trabajo es la siguiente:

1. **BIM Manager:** Es la persona encargada de liderar la estrategia de implementación de BIM a mediano y largo plazo, responsable de realizar la coordinación de los equipos BIM que participan en el proyecto y con capacidades en gestión de proyectos, estandarización de procesos, modelación básica y avanzada.
2. **Coordinador BIM:** Es el encargado de asegurar la gestión de la calidad y su cumplimiento en los proyectos BIM, con conocimientos en construcción, diferentes protocolos de intercambio de información y flujos de trabajo desde el punto de vista colaborativo.
3. **Especialista BIM:** Es la persona responsable desde el punto de vista técnico de la especialidad que refiera. Actúa como revisor y verificador de la información inherente a los entregables BIM, según la etapa del proyecto en que se encuentre.
4. **Modelador BIM:** Es la persona ejecutora de las actividades de modelado utilizando las herramientas, normatividad y software específicos propios de la especialidad, con conocimientos generales de la metodología, creación de contenidos, diseño y construcción.

El detalle de estos roles se referencia a partir del documento Roles y Perfiles BIM del BIM KIT 1 CAMACOL BIM FORUM.

### **6.4.3. Etapa 3: EJECUCIÓN**

Es esta etapa se tiene previsto realizar los siguientes componentes:

#### **a) Estructura propuesta de estándar BIM de la organización**

Para el estándar BIM de la organización, el presente trabajo propone la siguiente estructura:

- **Volumen 1:**

N°	TEMA	DESCRIPCIÓN
1	<b>Prólogo</b>	Avalado/Firmado por el Gerente General o el de Planeación. Justificación, alineación con las directrices de país, articulación con el mapa de procesos interno, que representa para el Metro y sus grupos de interés.
2	<b>Presentación</b>	Visión, propósitos del manual, proceso de desarrollo, filosofía (mostrar casos prácticos realizados), beneficios generales esperados.
3	<b>Introducción</b>	Terminología, estándares de referencia, estructura general del Manual con sus anexos.
4	<b>Aplicación del manual</b>	Obligatoriedad, alcance (etapas de proyecto, ciclo de vida activos) como debe ser considerado para personal metro para proveedores, descripción corta del área e integrantes que lideran su implementación.
5	<b>Estrategia digital BIM Metro</b>	Filosofía, bases de la estrategia, horizonte al 2025, ciclo de vida de los activos, sistemas de gestión integral y de SST.
6	<b>Implementación BIM Metro</b>	Planteamiento, afianzamiento, equipo PMO y roles BIM, pilares, periodicidad reuniones y objetivos, nivel de madurez actual y objetivo.
7	<b>La innovación BIM en el Metro</b>	Antecedentes IDI-Investigación, Desarrollo e Innovación (misión, visión, valores), áreas donde BIM aporta valor (gestión tecnológica. y digitalización, eficiencia energética y sostenibilidad, inclusión social, seguridad ferroviaria). Realidad extendida, gemelos digitales (gestión de activos), etc.

Tabla 35. Estructura propuesta para estándar metodológico BIM (componente estrategia)

Fuente: Elaboración propia

- **Volumen 2:**

N°	TEMA	DESCRIPCIÓN
1	<b>Principios Contractuales</b>	Conceptualización (prelación de la relación contractual), inclusión BIM en el proceso, propiedad de los modelos, responsabilidades, req. BIM en los contratos Metro (generalidades, EIR, recomendaciones para su redacción)
2	<b>Objetivos generales BIM</b>	Objetivos de la implementación + Objetivos ciclo de vida activos ferroviarios generales y específicos por etapa de ciclo de vida,

N°	TEMA	DESCRIPCIÓN
3	<b>Usos</b>	Definición de cada uno, listado, significado. Se deberá evaluar si es relevante incluir otros adaptados a sistemas ferroviarios. De base se tomarán los 25 de Penn State. Se describirá para cada uno: Valor esperado para Metro, estrategia OpenBIM, Objetivo que aplica, recursos, requisitos y resultado esperado. Uso por personal interno y los licitadores.
4	<b>Estructura de los Modelos</b>	Definiciones, tipología, división, LOD, LOI, LOV, maduración en las etapas del proyecto, sistemas de clasificación (BIM, SAP), ubicaciones técnicas.
5	<b>Condiciones digitales de modelos</b>	Inventario digital, Modelos de infraestructura existente y As Built, unidades, sistemas de coordenadas BIM/GIS, tolerancias y condiciones, alineamientos para vías viejas y nuevas, chequeo de interferencias (Matriz, tolerancias, lineamientos básicos)
6	<b>Estándares digitales</b>	Recopilación de instrumentos como: Guías, manuales y plantillas. Librerías de Objetos BIM: software autoría, extensiones de archivos
7	<b>Estrategia OpenBIM</b>	Justificación OpenBIM, IFC descripción y clasificación de entidades, gestión digital del cambio (BCF), evolución: IFC 4.3, IFC 4.4
8	<b>Entorno común de datos (CDE)</b>	Requerimientos mínimos, tipo de información que se almacenará, plataforma tecnológica, estructura de carpetas, codificación, ciclo documental
9	<b>Roles y Responsables BIM en contratos</b>	Roles y funciones a nivel interno Metro (actuales y futuras), exigencias contractuales en cada etapa del proyecto. Experiencia mínima requerida por Metro para licitantes. Organización y responsabilidades BIM en función de los usos BIM.
10	<b>Entregables</b>	Requerimientos generales, formato y atributos de los entregables, descripción corta de cada uno, tipología (nativo, abierto), articulación con la TAI. Listado ejemplo etapas del proyecto.
11	<b>Hardware/Software</b>	Integración de software BIM tanto abierto como propietario, Software requerido en función de los usos. Licenciamiento. Recomendaciones generales en cuanto configuración y usos para CADD/BIM/GIS.
12	<b>Bibliografía</b>	Estrategia de control de calidad, grado de cumplimiento de requisitos, ANS, auditorías de modelo, listas de verificación
13	<b>Anexos</b>	1. Glosario de términos
		2. Plantillas EIR (Modelos de requerimientos del cliente)
		3. Estándares digitales del Metro
		4. Sistemas de clasificación: Omniclass, Uniclass, Masterformat
		5. Guías técnicas de trabajo

Tabla 36. Estructura propuesta para estándar metodológico BIM (componente procedimental)

Fuente: Elaboración propia

## b) Reingeniería de proceso

### 1. Priorización de procesos.

Tal y como se indicó en la Etapa 2 PLANEACIÓN, el origen del proceso de GESTIÓN DE PROYECTOS proviene del macroproceso Gestión de la Estrategia del crecimiento y la Innovación. En este proceso, se puede observar que una vez se logra la priorización y asignación del presupuesto para el proyecto, se continúa con el desarrollo de las fases de inicio, planeación, ejecución y cierre del proyecto.

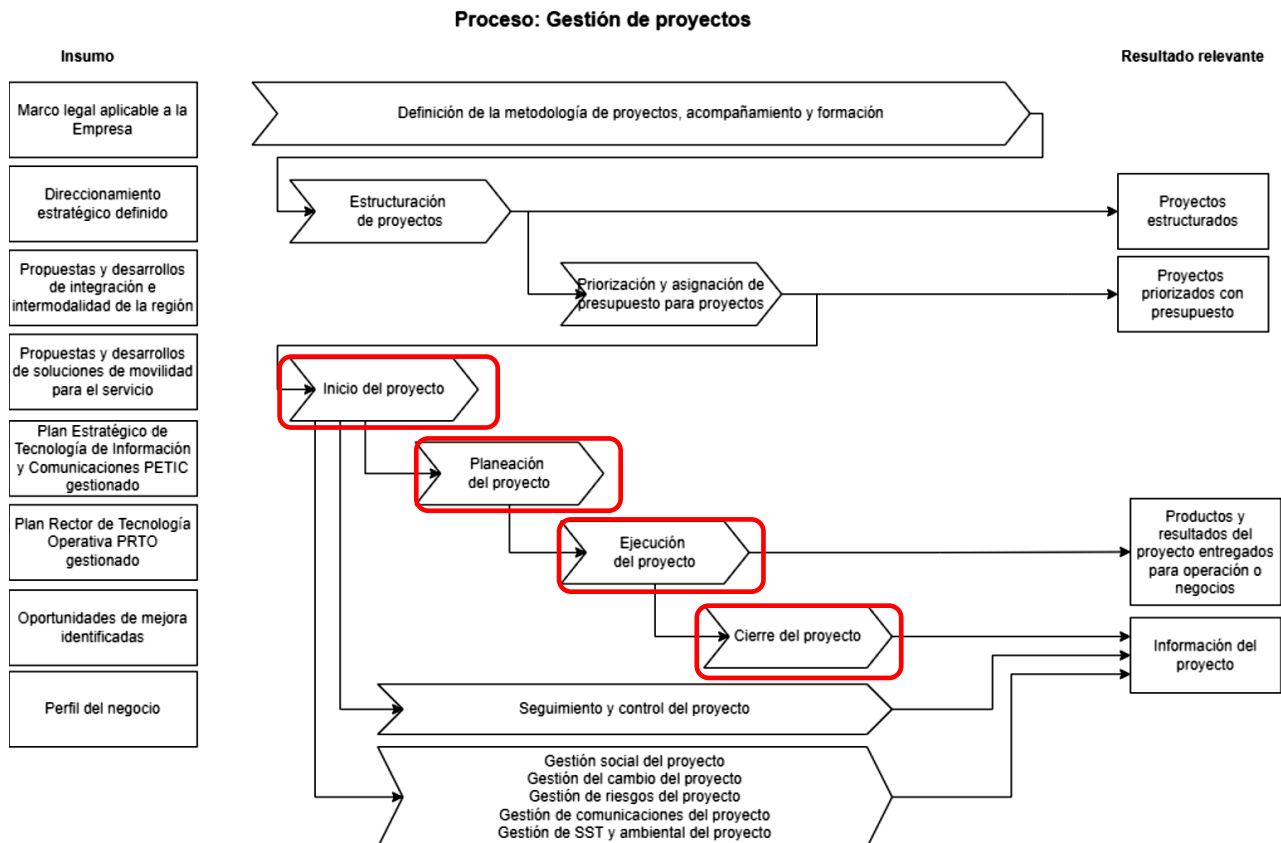


Ilustración 19: Proceso Gestión de Proyectos Metro de Medellín

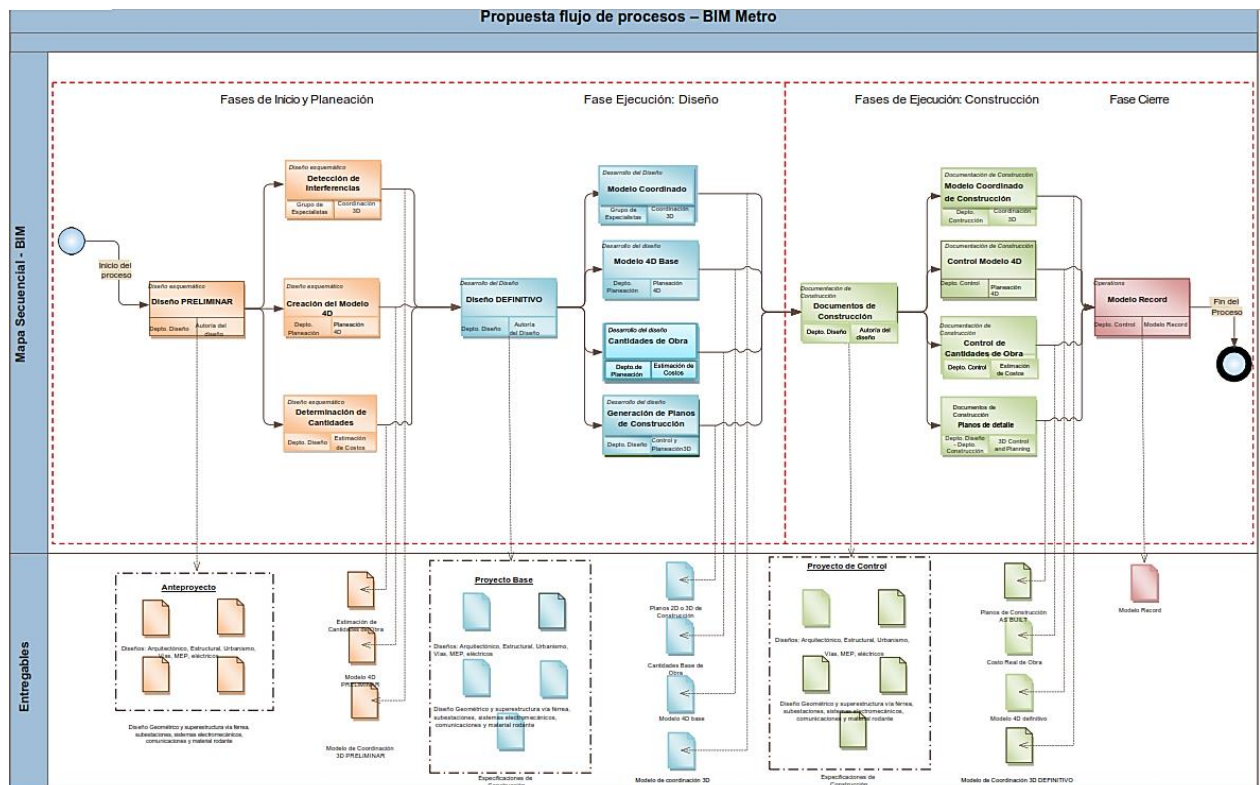
Fuente: Metro de Medellín

2. Observación.

Luego de surtir esta etapa de reconocimiento de los flujos del proceso de Gestión de Proyectos, se identifican los aspectos importantes para la incorporación de proceso BIM.

3. Propuesta y Prototipado.

En este punto del trabajo, se presenta una propuesta de incorporación de flujos BIM en cada una de las etapas del proceso de GESTIÓN DE PROYECTOS. Se dispondrá también para mejor visualización en el ANEXO 4-Flujos BIM proceso Gestión de Proyectos.



## Ilustración 20: Propuesta diagrama flujos BIM

Fuente: Elaboración propia

#### 4. Gestión del Conocimiento.

De acuerdo con los primeros resultados del autodiagnóstico en la Empresa, se deberá comenzar a documentar las lecciones aprendidas de la implementación de la metodología y el seguimiento a los proyectos piloto de la Empresa. Es importante mencionar que los equipos seleccionados deberán estar incorporados en la implementación, con el fin de minimizar la resistencia al cambio generada en esta nueva implementación.

##### **c) Formación y Capacitaciones**

Como uno de los pilares de la Metodología BIM, las personas cumplen un papel preponderante en la implementación de esta. En este sentido y para reducir la resistencia al cambio, se deberá generar un plan de capacitaciones complementarias de la metodología BIM propuestos desde la fase de planeación.

A continuación, se presenta un ejercicio realizado posterior a la elaboración del autodiagnóstico con la matriz de madurez RUTA BIM, en el cual se dispuso de un plan de capacitaciones a **245 personas** de los grupos interesados y que se le dará continuidad en los próximos años como parte de los objetivos de implementación. Los temas que se abordaron fueron fundamentos y Usos BIM, gestión información BIM y Herramientas de Consulta BIM. Estos fueron dirigidos a personas seleccionadas de los siguientes grupos de interés:

ÁREA (Grupos de Interés)
Gerencia de Planeación: Oficina PMO
Gerencia de Planeación: Planeación Estratégica
Gerencia de Planeación: I+D+I
Gerencia de Operación y Mantenimiento (GOM) - Sistema Operativo
GOM - Trenes
GOM - Tranvías
GOM - Cables aéreos
GOM - Buses
GOM - Ingeniería
GOM - Infraestructura
Gestión Urbana
Gestión de Tec. de Información
Administración documental

Tabla 37. Grupos de interés capacitaciones BIM

Fuente: Elaboración propia

#### **d) Transformación tecnológica**

El mapa estratégico de la organización contempla una perspectiva de “Procesos e Innovación” que tiene concatenados los objetivos estratégicos de “fortalecer la excelencia organizacional en la era de la transformación digital, fortalecer el ecosistema de innovación y fortalecer la gestión de activos de la Empresa. En este sentido, la transformación tecnológica como otro de los pilares de la implementación BIM deberá buscar y adecuar las tecnologías más



adecuadas a los proyectos de desarrolla la organización como resultado de los hallazgos del autodiagnóstico, desarrollo paralelo de proyectos piloto y la propia gestión del cambio en la Empresa.

En cuanto a la gestión de la tecnología, se deberán realizar las evaluaciones y verificaciones de los siguientes aspectos en cuanto a:

- a) Software (validación de licenciamientos, compatibilidad, interoperabilidad, disponibilidad)
- b) Hardware (validación de requisitos de servidores y ordenadores).
- c) Comunicación-red (validaciones de infraestructura de red y conexiones)

**d) Proyectos piloto BIM**

El éxito de la implementación BIM en las organizaciones radica en la puesta en marcha de proyectos piloto (Metro de la 80) caso con el cual se pretende que el equipo de trabajo inicie con la práctica de implementación e identificación de lecciones aprendidas y retos para el mejoramiento continuo para proyectos futuros.

**6.4.4. Etapa 4: MEDICIÓN Y SEGUIMIENTO**

Es la etapa que describe una serie de prácticas útiles durante el proceso de implementación midiendo su eficacia y buscando identificar oportunidades de mejora en el equipo de la organización y estará definida por los siguientes aspectos:

### a) Indicadores de Gestión BIM

Los indicadores de seguimiento en el plan de implementación permiten realizar controles continuos. Por ello y debido a varios aspectos cambiantes, entre ellos, la tecnología que evoluciona con celeridad, se adopta la recomendación de indicadores propuestos por RUTA BIM (Hoja de Ruta BIM Kit) los cuales se describen a continuación:

Nº	Indicador	OBJETIVO	DEFINICIÓN	UNIDAD	PERIODICIDAD	FORMA DE CALCULARLO
1	Índice de Madurez BIM (IMB)	Medir el avance en la implementación BIM a través de las dimensiones establecidas en la Matriz de Madurez del BIM Forum Colombia	Variación porcentual en el resultado de la medición de la matriz de madurez	%	Semestral/Anual	$\frac{(R2-R1)}{R1} * 100$ <b>R2</b> es el resultado de la medición vigente <b>R1</b> es el resultado de la medición anterior
2	Índice de Aumento de la Productividad (IAP)	Aumentar la capacidad productiva de los equipos de trabajo involucrados en la implementación BIM	Variación entre la cantidad de proyectos gestionados por un equipo	%	Semestral/Anual	$\frac{((P2/IE2)-(P1/IE1))}{(P1/IE1)} * 100$ <b>P2</b> es la cantidad de proyectos del periodo vigente. <b>IE2</b> es la cantidad de integrantes del equipo en el periodo vigente. <b>P1</b> es la cantidad de proyectos del periodo anterior <b>IE1</b> es la cantidad de integrantes del equipo en el periodo anterior
3	Índice de Efectividad de la Gestión de Cambio (IEGC)	Aumentar la efectividad de las capacitaciones y estrategias de gestión del cambio con los equipos de diseño	Aumentar la efectividad de las capacitaciones y estrategias de gestión del cambio con los equipos de diseño	%	1 vez por proyecto y por equipo	$\frac{(RA2-RA1)}{RA1} * 100$ <b>RA2</b> es el promedio del resultado de las auditorías de modelo del proyecto 2 <b>RA1</b> es el promedio del resultado de las auditorías de modelo del proyecto 1

Nº	Indicador	OBJETIVO	DEFINICIÓN	UNIDAD	PERIODICIDAD	FORMA DE CALCULARLO
4	Índice de Replicación de Pilotos (IRP)	Mejorar el acceso a desarrollos exitosos en la compañía	Porcentaje de adopción de pilotos exitosos en todos los proyectos	%	Semestral (por piloto exitoso)	$(P2/P1)*100$ P1 es la cantidad de proyectos en el periodo P2 es la cantidad de proyectos en los que se ha implementado el piloto exitoso
5	Índice de Capacitación BIM (ICB)	Aumentar el nivel de conocimiento en la metodología BIM en los equipos involucrados	Porcentaje de personal capacitado sobre el total proyectado en la implementación	%	Semestral/Anual	$PC/PT*100$ PC es el número de personas capacitadas PT es el número total de personas proyectadas a capacitar
6	Índice de Adopción BIM (IAB)	Medir la adopción de BIM en la compañía en función de los proyectos activos	Porcentaje de proyectos BIM en la compañía	%	Anual	$(P2/P1)*100$ P1 es la cantidad de proyectos en el periodo P2 cantidad de proyectos BIM

Tabla 38. Indicadores de gestión BIM

Fuente: Elaboración propia a partir de CAMACOL RUTA BIM

**b) Incentivar participación de equipos metro e identificación de oportunidades de mejora**

Desde el programa de gestión del cambio se establecerán políticas empresariales como incentivos y planes de crecimiento profesional de acuerdo con los resultados obtenidos. Igualmente se deberán identificar las oportunidades de mejora de acuerdo con los planes de seguimiento a establecer desde la etapa de ejecución y seguimiento.

#### **6.4.5. Etapa 5: RETROALIMENTACIÓN**

Es la etapa final en las que se procesan los comentarios sobre los entregables, procedimientos y mediciones con un objetivo direccionado a la mejora continua de manera iterativa, sugiriendo revisar de nuevo toda la hoja de ruta y así buscar rectificar la estrategia. Esta etapa se encuentra definida por los siguientes aspectos:

##### **a) Matriz de madurez BIM**

Se deberá surtir unas nuevas mediciones del nivel de madurez en la Empresa con el fin de comparar la evolución de los aspectos más importantes en cuanto a la capacidad BIM y a los aspectos Organizacionales. Es importante realizar la comparación con base en uno de los indicadores propuestos en la etapa de medición comparativa en la fase 1 acotada a 2025.

##### **b) Oportunidades de mejora y ajuste a políticas y procesos para nuevos proyectos METRO**

En esta etapa y dadas las dinámicas propias de la implementación, será necesario unos ajustes a la estandarización de los procesos propios de la organización, en el caso de la Empresa, el de Gestión de Proyectos. Estos ejercicios vienen nutridos por las conclusiones y lecciones aprendidas de los proyectos piloto que se llevan a cabo den la empresa y el día a día de la implementación. También se deberá realizar las validaciones y verificaciones de los entregables propuestos, debidamente documentados; esto permitirá si el alcance de la implementación se deberá ajustar o replantear frente a nuevos retos propuestos en el proceso de implementación.

## 7. CONCLUSIONES

De acuerdo con los hallazgos del estado del arte, los proyectos de infraestructura férrea y metros son de alta complejidad y no siempre cuentan con una metodología de trabajo colaborativo y con la participación de múltiples actores desde etapa previa. Debido a lo anterior, es poca la información publicada sobre implantación de BIM en estos sistemas férreos en el mundo, sin embargo, a los resultados obtenidos y reportados se les puede catalogar como exitosos, sin desconocer las barreras que tuvieron que superar por implementar una metodología nueva de trabajo que impacta a toda una organización.

Si bien no es fácil iniciar con un proceso de implementación de la metodología BIM al interior de las organizaciones, en especial entidades públicas estructuradoras de proyectos de transporte masivo como el Metro de Medellín, es necesario un compromiso importante desde los altos directivos. Actividades como la gestión del cambio y un autodiagnóstico de implementación de BIM, son la puerta de entrada y la primera línea base, con ello, servir de partida para futuros ejercicios, tal es el resultado obtenido del nivel “inicial” de madurez gestionado a partir del cuestionario propuesto por la herramienta RUTABIM de BIM Forum Camacol, el cual se comparará con las metas establecidas a 2025. Experiencias previas han desarrollado metodologías de implementación que se sugiere adoptar, para realizar el proceso ordenado con un horizonte alineado a la política nacional de digitalización y de implementación BIM en proyectos públicos a 2026.

En cuanto a los lineamientos propuestos a nivel contractual sobre la implementación de la metodología BIM para el proyecto Metro de la 8o, tanto para la elaboración del Plan de Ejecución BIM (PEB) por parte del ejecutor del proyecto como las especificaciones técnicas contractuales para el contratista y la interventoría, por medio del presente trabajo de investigación se sugiere

una serie de requerimientos básicos tomados de un referentes internacional como Plan BIM Chile el cual es un caso de implementación exitoso y que hace parte de la estrategia de país impulsada por el gobierno de Chile.

Los proyectos piloto deben incluir requisitos contractuales BIM, siguiendo los lineamientos de la metodología adoptada por la empresa y midiendo el avance permanente a partir de indicadores que permitan establecer planes de mejoramiento. Dichos resultados se deben evaluar periódicamente determinando el nivel de madurez BIM (usos de la metodología en la organización), las capacidades BIM (identificar procesos y su utilización en la organización) y la escala organizacional (clasificación de desempeño en el uso de la metodología frente a otras empresas).

Respecto al aporte final sobre una propuesta de estructura de implementación BIM en la empresa Metro de Medellín en las fases de inicio, planeación, ejecución, medición y retroalimentación con el horizonte a 2025, como paso previo a la estrategia nacional de implementación de la metodología a 2026 en proyectos públicos en pro de vincular la transformación digital al interior de las organizaciones del sector de la construcción con el fin de aumentar la productividad y minimizar los efectos de retrasos y sobrecostos, se espera que en este horizonte propuesto a 3 años, evolucione satisfactoriamente y se alcancen las metas esperadas en el cronograma de actividades propuesto en el numeral 6.4 del presente trabajo de investigación.

Se esperan mejores resultados de la gestión de proyectos de la Empresa mediante la implementación de la metodología BIM en este proyecto piloto como disminución de costos, de tiempos, adopción de nuevas tecnologías para control de proyectos, mejora de la calidad, satisfacción de los usuarios, que sirva además de referente para futuros proyectos de la Empresa como política interna en pro de la mejora en la gestión de proyectos, como respuesta al cuestionamiento indicado en la justificación de este trabajo de investigación.

Un último aporte y no menos importante, es que lo descrito en este trabajo de investigación, sirva de referente tanto para las empresas originadoras de proyectos de transporte masivo en nuestro país como un primer paso por la apuesta de la implementación de la metodología BIM al interior de sus organizaciones, además que vaya de la mano como la promoción continua de esta iniciativa en las demás entidades del sector público y privado, elevando la conciencia y obligatoriedad de la estrategia nacional a 2026.

## 8. BIBLIOGRAFÍA

- ACCA software. (2022). *¿BIM u openBIM? iesa la cuestión.*  
[https://www.accasoftware.com/es/open-bim-vs-closed-bim?gclid=CjoKCQIAvqGcBhCJARIsAFQ5ke5nIboSGAK19tN74MAIXjimxzC26ytxSgMNMbQgfs57uAGArUykOSMaAmomEALw\\_wcB](https://www.accasoftware.com/es/open-bim-vs-closed-bim?gclid=CjoKCQIAvqGcBhCJARIsAFQ5ke5nIboSGAK19tN74MAIXjimxzC26ytxSgMNMbQgfs57uAGArUykOSMaAmomEALw_wcB)
- Akponeware, A., Dawood, N., Rodriguez-Trejo, S., & Dawood, H. (2022). An integrated empirical analysis of UK rail industry's carbon assessment: An industry perspective. *Case Studies on Transport Policy*, 10(1), 315–330. <https://doi.org/10.1016/j.cstp.2021.12.012>
- Akula, M., Lipman, R. R., Franaszek, M., Saidi, K. S., Cheok, G. S., & Kamat, V. R. (2013). Real-time drill monitoring and control using building information models augmented with 3D imaging data. *Automation in Construction*, 36, 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2013.08.010>
- Amerio, M. (2020). Doha Metro Project: 3TI lesson learned. *Transportation Research Procedia*, 45, 866–873. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2020.02.082>
- Barone, G., Buonomano, A., Forzano, C., Giuzio, G. F., & Palombo, A. (2022a). Energy, economic, and environmental impacts of enhanced ventilation strategies on railway coaches to reduce Covid-19 contagion risks. *Energy*, 256. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124466>
- Barone, G., Buonomano, A., Forzano, C., Giuzio, G. F., & Palombo, A. (2022b). Assessing energy demands of building stock in railway infrastructures: a novel approach based on bottom-up modelling and dynamic simulation. *Energy Reports*, 8, 7508–7522. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.05.253>
- Bedrick, J., Faia, W., Ikerd, P. E., & Reinhardt, J. (2020). *LEVEL OF DEVELOPMENT (LOD) SPECIFICATION PART I & COMMENTARY For Building Information Models and Data.* [www.bimforum.org/lod](http://www.bimforum.org/lod)
- Bensalah, M., Elouadi, A., & Mharzi, H. (2018). BIM integration into railway projects - case study. *Contemporary Engineering Sciences*, 11(44), 2181–2199. <https://doi.org/10.12988/ces.2018.85217>
- BENSALAH, M., ELOUADI, A., & MHARZI, H. (2019). Railway Information Modeling - A Review of Railway Project Management Integrating BIM. *International Journal of Railway*, 12(1), 10–17. <https://doi.org/10.7782/ijr.2019.12.1.010>
- Bensalah, M., Elouadi, A., & Mharzi, H. (2019). Overview: the opportunity of BIM in railway. *Smart and Sustainable Built Environment*, 8(2), 103–116. <https://doi.org/10.1108/SASBE-11-2017-0060>
- BibLus. (2021, December 20). *Open BIM qué es y cómo ponerlo en práctica.*  
<https://biblus.accasoftware.com/es/open-bim-que-es-y-como-ponerlo-en-practica/>
- Bilosi S., Orci C., de Matteis F., & Benedetti G. (2019). *The 3D-BIM-FEM modeling of the Mairie des Lilas Paris metro station line 11.* <https://doi.org/10.1201/9780429424441-211>
- BIM Corner. (2022, September 14). *All you need to know about IFC 4.3 for infrastructure.*  
<https://bimcorner.com/ifc-4-3-for->



- infrastructure/?utm\_source=newsletter&utm\_medium=email&utm\_campaign=name\_no\_w\_you\_can\_finally\_start\_learning\_parametric\_design\_join\_100\_free\_training\_session&utm\_term=2022-12-13
- BIM FORUM LATAM. (2021, November 16). *Implementación BIM en Latinoamérica: Avances 2021*. <https://www.youtube.com/watch?v=lfmDebGY1rg>
- BIM GOB LATAM. (2020, September 8). *BIM-Red de Gobiernos Latinoamericanos*. <https://redbim goblatam.com/>
- BIME Initiative. (2021, March 13). *BIM Dictionary*. <https://bimdictionary.com/>
- Botero Botero, L. F. (2021). *Principios, herramientas e implementación de Lean Construction* (C. Suárez, Ed.; 2021st ed.). Universidad EAFIT. <https://doi.org/https://doi.org/10.17230/9789587207040lro>
- Building Smart International. (2019, March 19). *IFC Specifications Database*. <https://technical.buildingsmart.org/standards/ifc/ifc-schema-specifications/>
- BuildingSMART. (2020, March 20). *openBIM - buildingSMART International*. <https://www.buildingsmart.org/about/openbim/>
- CAMACOL. (2018). *Hoja de Ruta BIM KIT 1 (BIM Forum Camacol)*. <https://camacol.co/productividad-sectorial/digitalizacion/bim-forum/bim-kit>
- CAMACOL. (2020a, November 3). *Herramienta RUTA BIM*. <https://www.youtube.com/watch?v=HeSruJVbMok>
- CAMACOL. (2020b, November 5). *Ruta BIM*. <https://rutabim.com/#/landing>
- CAMACOL. (2021, December 3). *BIM Forum*. <https://camacol.co/productividad-sectorial/digitalizacion/bim-forum>
- Cheng, Y. J., Qiu, W. G., & Duan, D. Y. (2019). Automatic creation of as-is building information model from single-track railway tunnel point clouds. *Automation in Construction, 106*. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.102911>
- Cho, H., Lee, K. H., Lee, S. H., Lee, T., Cho, H. J., Kim, S. H., & Nam, S. H. (2011). *INTRODUCTION OF CONSTRUCTION MANAGEMENT INTEGRATED SYSTEM USING BIM IN THE HONAM HIGH-SPEED RAILWAY LOT NO. 4-2*.
- Cobo Pérez, B. S. (2017). *Análisis de las desviaciones de Tiempo y Costo en proyectos de Infraestructura Vial en Colombia (Tesis de Maestría)*. Universidad de los Andes.
- Cortes, M., & Iglesias León, M. (2004). *Diseño y Desarrollo del Porceso de Investigación*. 174 p.
- Darroch, N., Beecroft, M., & Nelson, J. D. (2021). A qualitative analysis of the interfaces between urban underground metro infrastructure and its environment in London. *Tunnelling and Underground Space Technology, 114*. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2021.103930>
- Davila Delgado, J. M., & Oyedele, L. (2021). Digital Twins for the built environment: learning from conceptual and process models in manufacturing. *Advanced Engineering Informatics, 49*. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2021.101332>
- Díaz D. (2022, September 13). *Entorno común de datos e ISO 19650-1 — Grupo Civilízate*. <https://www.grupocivilizate.com/snacks-blogs/entorno-comun-de-datos-e-iso-19650-1-xsms8>
- Espacio BIM. (2018, December 7). *BEP o Plan de Ejecución BIM (Qué es)*. <https://www.espaciobim.com/bep>

- Fabozzi, S., Biancardo, S. A., Veropalumbo, R., & Bilotta, E. (2021). I-BIM based approach for geotechnical and numerical modelling of a conventional tunnel excavation. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 108. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2020.103723>
- Función Pública. (2018, October 26). *Decreto 3109 de 1997*. <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=3332>
- Geng, D., & Vojtasik, K. (2008). Application of BIM Technology in Subway Station Construction. *International Research Journal of Engineering and Technology*, 195. [www.irjet.net](http://www.irjet.net)
- Gómez, D. (2020). *Estrategia de adopción BIM en Colombia*. <https://camacol.co/sites/default/files/LANZAMIENTO%20DE%20LA%20ESTRATEGIA%20DE%20ADOPCIÓN%20DE%20BIM%20EN%20COLOMBIA.pdf>
- Gopang, R. K. M., Imran, Q. B. A., & Nagapan, S. (2020). Assessment of delay factors in Saudi Arabia railway/metro construction projects. *International Journal of Sustainable Construction Engineering and Technology*, 11(2), 225–233. <https://doi.org/10.30880/ijscet.2020.11.02.028>
- Grandio, J., Riveiro, B., Soilán, M., & Arias, P. (2022). Point cloud semantic segmentation of complex railway environments using deep learning. *Automation in Construction*, 141. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104425>
- Häußler, M., & Borrmann, A. (2020). Model-based quality assurance in railway infrastructure planning. *Automation in Construction*, 109. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.102971>
- Hidaka, N., Michikawa, T., Motamedi, A., Yabuki, N., & Fukuda, T. (2018). Polygonization of point clouds of repetitive components in civil infrastructure based on geometric similarities. *Automation in Construction*, 86, 99–117. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.10.014>
- Hu, Z. Z., Zhang, J. P., Yu, F. Q., Tian, P. L., & Xiang, X. S. (2016). Construction and facility management of large MEP projects using a multi-scale building information model. *Advances in Engineering Software*, 100, 215–230. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2016.07.006>
- Huang, M. Q., Ninić, J., & Zhang, Q. B. (2021). BIM, machine learning and computer vision techniques in underground construction: Current status and future perspectives. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 108(December 2020). <https://doi.org/10.1016/j.tust.2020.103677>
- Huang, M. Q., Zhu, H. M., Ninić, J., & Zhang, Q. B. (2022). Multi-LOD BIM for underground metro station: Interoperability and design-to-design enhancement. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 119. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2021.104232>
- Jiang, H., Tian, M., Chen, Y., Zhang, G., & Peng, X. (2022). Metro Engineering Project Schedule Optimization Based on Wireless Network Communication and BIM Model Algorithm. *Scientific Programming*, 2022. <https://doi.org/10.1155/2022/3900615>
- Jiménez, A. (2018). *PROPUESTA METODOLÓGICA PARA DETERMINAR SI LA INFRAESTRUCTURA DE UN SISTEMA DE TRANSPORTE MASIVO DEBE SER SUBTERRÁNEA, A NIVEL O EN VIADUCTO*. Universidad Nacional de Colombia.
- Jing, G., Qin, X., Wang, H., & Deng, C. (2022). Developments, challenges, and perspectives of railway inspection robots. In *Automation in Construction* (Vol. 138). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104242>

- Kaewunruen, S., & Lian, Q. (2019). Digital twin aided sustainability-based lifecycle management for railway turnout systems. *Journal of Cleaner Production*, 228, 1537–1551. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.156>
- KAIZEN Arquitectura & Ingeniería. (2021). *¿QUÉ ES EL BIM? Modelo Virtual*. <https://www.kaizenai.com/bim/que-es-el-bim/>
- Khosravi, M., & Kähkönen, K. (2015). Management and Planning Under Complexities of Metro Construction. *Procedia Economics and Finance*, 21(15), 415–421. [https://doi.org/10.1016/s2212-5671\(15\)00194-x](https://doi.org/10.1016/s2212-5671(15)00194-x)
- Kim, H. S., Sangmi-Park, Sunju-Han, & Kang, L. S. (2017). AR-based 4D CAD System Using Marker and Markerless Recognition Method. *Procedia Engineering*, 196, 29–35. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.07.169>
- KINENERGY. (2021, June 4). *Las etapas de madurez BIM*. Adriana. <https://www.kin.energy/blogs/post/las-etapas-de-madurez-bim>
- Koch, C., Vonthron, A., & König, M. (2017). A tunnel information modelling framework to support management, simulations and visualisations in mechanised tunnelling projects. *Automation in Construction*, 83, 78–90. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.07.006>
- Kozin, E. (2016). Safety Operation Assurance for Metro Artificial Facilities during Underground Space Development in St. Petersburg. *Procedia Engineering*, 165, 418–432. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.11.717>
- Li, M., Yu, H., Jin, H., & Liu, P. (2018). Methodologies of safety risk control for China's metro construction based on BIM. *Safety Science*, 110, 418–426. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2018.03.026>
- Liu, B., & Sun, X. (2018). Application Analysis of BIM Technology in Metro Rail Transit. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 128(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/128/1/012028>
- Liu, Y., Liu, Y., Lin, M., Zhang, J., Yang, C., Huang, G., Zhang, Y., & Zhao, Q. (2020). Research on Application of BIM 5D in Communication of Project Multi-participants - A Case Study of Nagpur Metro Project. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 568(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/568/1/012051>
- Love, P. E. D., Zhou, J., Edwards, D. J., Irani, Z., & Sing, C. P. (2017). Off the rails: The cost performance of infrastructure rail projects. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 99, 14–29. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2017.02.008>
- Luo, H., Peng, X., & Zhong, B. (2016). Application of Ontology in Emergency Plan Management of Metro Operation. *Procedia Engineering*, 164, 158–165. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.11.605>
- Martínez Carazo, P. (2006). El método de estudio de caso: Estrategia metodológica de la investigación científica. *Pensamiento & Gestión*, 20, 165–193.
- Matejov, A., & Šestáková, J. (2021). The Experiences with utilization of BIM in railway infrastructure in Slovak Republic and Czech Republic. *Transportation Research Procedia*, 55, 1139–1146. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2021.07.084>
- Metro de Medellín. (2021a, March 19). *Características tecnológicas Metro Ligerito*. <https://metrodel80.gov.co/sobre-el-proyecto/caracteristicas-tecnologicas>

- Metro de Medellín. (2021b). *Memoria de Sostenibilidad Metro de Medellín 2021*.  
<https://21531211.fs1.hubspotusercontent-na1.net/hubfs/21531211/Memorias%20de%20Sostenibilidad/Memoria-de-sostenibilidad-Metro-de-medellin-2021.pdf>
- Metro de Medellín. (2021c, December 19). *Metro de Medellín-historia*.  
<https://www.metrodemedellin.gov.co/quienes-somos/historia>
- Metro de Medellín. (2022a, July 16). *Direccionamiento estratégico Metro de Medellín*.  
<https://www.metrodemedellin.gov.co/quienes-somos/direccionamiento-estrategico>
- Metro de Medellín. (2022b). *MIG\_Manual\_integrado\_de\_gestión (2022)*.
- Metro de Medellín. (2022c, November 28). *Mapas Metro de Medellín*.  
<https://www.metrodemedellin.gov.co/viaje-con-nosotros/mapas>
- Metro de Medellín - M.I.G. (2021). *Manual Integrado de Gestión*.
- Mojica, A., & Valencia, D. (2012). *IMPLEMENTACIÓN DE LAS METODOLOGÍAS BIM COMO HERRAMIENTA PARA LA PLANIFICACIÓN Y CONTROL DEL PROCESO CONSTRUCTIVO DE UNA EDIFICACIÓN EN BOGOTÁ* [PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA]. <https://repository.javeriana.edu.co/handle/10554/11135>
- Motamedi, A., Wang, Z., Yabuki, N., Fukuda, T., & Michikawa, T. (2017). Signage visibility analysis and optimization system using BIM-enabled virtual reality (VR) environments. *Advanced Engineering Informatics*, 32, 248–262.  
<https://doi.org/10.1016/j.aei.2017.03.005>
- MundoBIM. (2017, March 15). *Niveles de desarrollo (LOD) y su importancia en Revit*.  
<https://mundobim.com/2017/03/level-of-development-lod-bim/>
- Ninić, J., Freitag, S., & Meschke, G. (2017). A hybrid finite element and surrogate modelling approach for simulation and monitoring supported TBM steering. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 63, 12–28. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2016.12.004>
- Pasetto, M., Giordano, A., Borin, P., & Giacomello, G. (2020). Integrated railway design using Infrastructure-Building Information Modeling. the case study of the port of Venice. *Transportation Research Procedia*, 45, 850–857.  
<https://doi.org/10.1016/j.trpro.2020.02.084>
- PennState. (2011, November 4). *BIM Uses | BIM Planning*. PennState College of Engineering.  
<https://bim.psu.edu/uses/>
- Project-Tools. (2012, February 12). *Modelos de Madurez*.  
<https://projectools.wordpress.com/modelos-de-madurez-en-gestion-de-proyectos/>
- Ramírez, M., Victoria Arango Olmos, A., Blum Ministra de Relaciones Exteriores Alberto Carrasquilla Barrera, C., Augusto Sarmiento Olarte, J., Holmes Trujillo García Ministro de Defensa Nacional Rodolfo Enrique Zea Navarro, C., Ruíz Gómez, F., Custodio Cabrera Báez Ministro del Trabajo Diego Mesa Puyo Ministro de Minas Energía José Manuel Restrepo Abondano, Á., Victoria Angulo González Ministra de Educación Nacional Ricardo José Lozano Picón, M., Tybalt Malagón González Ministro de Vivienda, J., Territorio Karen Cecilia Abudinen Abuchaibe, C., María Orozco Gómez, Á., Lucena Barrero, E., Gisela Torres Torres, M., Alberto Rodríguez Ospino, L., & Gómez Gavia Subdirector General Sectorial Amparo García Montaña, D. (2020). *CONSEJO NACIONAL DE POLÍTICA ECONÓMICA Y*

- SOCIAL-CONPES 4003*.  
<https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Econ%C3%B3micos/4003.pdf>
- Romanovich, M., Kuzmenkova, M., Breskich, V., & Kulakov, K. (2021). Using the laser scanning method in the reconstruction of metro stations. *Transportation Research Procedia*, 54, 819–826. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2021.02.135>
- Soilán, M., Nóvoa, A., Sánchez-Rodríguez, A., Justo, A., & Riveiro, B. (2021). Fully automated methodology for the delineation of railway lanes and the generation of IFC alignment models using 3D point cloud data. *Automation in Construction*, 126. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103684>
- Soler Severino, M., Choclán Gámez, F., & González Márquez, R. (2014). *INTRODUCCION A LA METODOLOGÍA BIM ESPAI BARÇA View project*. <https://www.researchgate.net/publication/284159764>
- Soto, C., Manríquez, S., Godoy, P., Briones, C., Valenzuela, P., Gutiérrez, K., Morales, B., Salinas, R., Frávega, A., Aburto, D., Acosta, F., Acuña, I., Ascencio, C., Avendaño, D., Bass, L., Besançon, Y., Bombardiere, R., Cabezas, R., Campos, E., ... Zapata, P. (2019). *ESTANDAR BIM PARA PROYECTOS PÚBLICOS (PlanBIM)*. <https://planbim.cl/biblioteca/documentos/estandar-bim-para-proyectos-publicos/>
- Steuer, H., Flurl, M., Donaubaue, A., Mundani, R. P., Kolbe, T. H., & Rank, E. (2014). Collaborative planning of inner-city-railway-tracks: A generic description of the geographic context and its dynamic integration in a collaborative multi-scale geometry modelling environment. *Advanced Engineering Informatics*, 28(4), 261–271. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2014.08.002>
- Tejedo Cerrato, L. (2021). *METODOLOGÍA BIM APLICADA AL SECTOR FERROVIARIO: AUDITORÍA DE LA INSTALACIÓN DE PCI DE UNA ESTACIÓN DEL METRO DE MADRID JUNIO 2021*. Universidad Politécnica de Madrid.
- Tian, P.-L., Hu, Z.-Z., Wang, H.-W., Zhang, J.-P., Zou, D., & Com, Z. (2015). *BIM-based Meticulous Construction Management for Metro Station Projects: A Case Study*.
- Timetoast. (2021, April). *Historia de los Modelos BIM timeline*. <https://www.timetoast.com/timelines/bim>
- UITP. (2019). *STATISTICS BRIEF The Global Tram Light Rail Landscape*. <https://www.uitp.org/publications/the-global-tram-and-light-rail-landscape/>
- UITP. (2022). *STATISTICS BRIEF World Metro Figures 2021*. <https://www.uitp.org/publications/metro-world-figures-2021/>
- Velásquez, C. v. (2015). *Espacio público y movilidad urbana Sistemas Integrados de Transporte Masivo (SITM)*. Universidad de Barcelona.
- Wang, G., & Zhang, Z. (2021). BIM implementation in handover management for underground rail transit project: A case study approach. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 108. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2020.103684>
- Wang, T. (2021). The Intelligent Beijing–Zhangjiakou High-Speed Railway. *Engineering*, 7(12), 1665–1672. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2021.10.006>
- Wu, S., & Zhang, X. (2022). Visualization of Railway Transportation Engineering Management Using BIM Technology under the Application of Internet of Things Edge Computing.

*Wireless Communications and Mobile Computing*, 2022.

<https://doi.org/10.1155/2022/4326437>

- Xue, Y., Shi, P., Jia, F., & Huang, H. (2022). 3D reconstruction and automatic leakage defect quantification of metro tunnel based on SfM-Deep learning method. *Underground Space (China)*, 7(3), 311–323. <https://doi.org/10.1016/j.undsp.2021.08.004>
- Zhou, C., Luo, H., Fang, W., Wei, R., & Ding, L. (2019). Cyber-physical-system-based safety monitoring for blind hoisting with the internet of things: A case study. *Automation in Construction*, 97, 138–150. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.10.017>
- Zhou, H., Zhao, Y., Shen, Q., Yang, L., & Cai, H. (2020). Risk assessment and management via multi-source information fusion for undersea tunnel construction. *Automation in Construction*, 111. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.103050>
- Zhou, S., Dumss, S., Nowak, R., Riegler, R., Kugu, O., Krammer, M., & Grafinger, M. (2022). A Conceptual Model-based Digital Twin Platform for Holistic Large-scale Railway Infrastructure Systems. *Procedia CIRP*, 109, 362–367. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.05.263>
- Zhou, Y., Ding, L. Y., & Chen, L. J. (2013). Application of 4D visualization technology for safety management in metro construction. *Automation in Construction*, 34, 25–36. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2012.10.011>
- Ziv, N., Kindinis, A., Simon, J., & Gobin, C. (2021). Application of systems engineering for development of multifunctional metro systems: Case study on the fifth metro line of the Lyon metro, France. *Underground Space (China)*, 6(1), 24–34. <https://doi.org/10.1016/j.undsp.2019.09.001>

## **9. ANEXOS**

**9.1. ANEXO 1-numeral 6.1:** Cuestionario herramienta RUTA BIM CAMACOL.

**9.2. ANEXO 2-numeral 6.2:** Plantillas Plan de ejecución BIM (P.E.B) respecto a los alcances de los contratos BIM y usos BIM que se darán en el proyecto.

**9.3. ANEXO 3-numeral 6.3:** Requerimientos para el contratista y la interventoría del proyecto para la fase 3 de diseños y construcción del proyecto en cuanto a la implementación del BIM.

**9.4. ANEXO 4-numeral 6.4:** Flujos BIM proceso Gestión de Proyectos.