



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Evaluación preliminar de bancos
de agregados pétreos para
infraestructura ferroviaria**

INFORME DE ACTIVIDADES PROFESIONALES

Que para obtener el título de

Ingeniero Geólogo

P R E S E N T A

Fernando Jaaciel Urbina Baltazares

ASESOR DE INFORME

Ing. José Luis Arcos Hernández



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2026



**PROTESTA UNIVERSITARIA DE INTEGRIDAD Y
HONESTIDAD ACADÉMICA Y PROFESIONAL
(Titulación con trabajo escrito)**



De conformidad con lo dispuesto en los artículos 87, fracción V, del Estatuto General, 68, primer párrafo, del Reglamento General de Estudios Universitarios y 26, fracción I, y 35 del Reglamento General de Exámenes, me comprometo en todo tiempo a honrar a la institución y a cumplir con los principios establecidos en el Código de Ética de la Universidad Nacional Autónoma de México, especialmente con los de integridad y honestidad académica.

De acuerdo con lo anterior, manifiesto que el trabajo escrito titulado EVALUACION PRELIMINAR DE BANCOS DE AGREGADOS PETREOS PARA INFRAESTRUCTURA FERROVIARIA que presenté para obtener el título de INGENIERO GEÓLOGO es original, de mi autoría y lo realicé con el rigor metodológico exigido por mi Entidad Académica, citando las fuentes de ideas, textos, imágenes, gráficos u otro tipo de obras empleadas para su desarrollo.

En consecuencia, acepto que la falta de cumplimiento de las disposiciones reglamentarias y normativas de la Universidad, en particular las ya referidas en el Código de Ética, llevará a la nulidad de los actos de carácter académico administrativo del proceso de titulación.

FERNANDO JAACIEL URBINA BALTAZARES
Número de cuenta: 314121046

ÍNDICE

Resumen	8
1. Introducción.	9
1.1. Contexto profesional.	9
1.2. Relación con la empresa.	10
1.3. Justificación del informe.	10
2. Marco contextual y normativo.	12
2.1. Descripción de los proyectos AIFA-Pachuca y CDMX-Querétaro.	12
2.1.1. Proyecto AIFA-Pachuca.	12
2.1.2. Proyecto CDMX-Querétaro.	13
2.1.3. Proyecto Saltillo-Nuevo Laredo.	14
2.2. Marco normativo de los proyectos.	15
2.2.1. NOM-003-ARTF-2023.	15
2.2.2. Lineamientos de suministro de balasto ARTF.	18
2.2.3. Especificación Técnica de balasto: AIFA-Pachuca.	19
2.2.4. Especificación Técnica de balasto: CDMX-Querétaro.	20
2.2.5. Especificación Técnica de balasto: Saltillo-Nuevo Laredo.	21
3. Perfil de la empresa y rol profesional.	22
3.1. Especialización y servicios de la empresa.	22
3.2. Funciones como Ingeniero Geólogo / Subdirector de Plataforma.	22
3.2.1. Diseño técnico y consolidación metodológica.	23
3.2.2. Prospección y análisis de bancos de material.	23
3.2.3. Elaboración de productos técnicos de apoyo a la toma de decisiones.	24
3.2.4. Participación en procesos estratégicos de gestión.	24
3.3. Equipo de trabajo y actores clave de interacción.	25
4. Metodología de evaluación de bancos de materiales.	26
4.1. Investigación documental (técnica y normativa).	26
4.1.1. Revisión de normativa ferroviaria nacional e internacional.	26
4.1.2. Principio de selección del balasto como material guía en la evaluación de agregados.	26
4.1.3. Evolución histórica en la selección de materiales para balasto.	28
4.1.4. Propiedades geológicas, físico-mecánicas y granulométricas relevantes en la calidad del balasto.	29
4.1.5. Jerarquía de tipos de roca según su idoneidad para balasto.	34
4.1.6. Desarrollo del índice de calidad (ICPB).	35

4.1.7. Ejemplos de aplicación del ICPB.	37
4.2. Identificación y clasificación de zonas con potencial geológico para la producción de agregados (ejemplos).	43
4.2.1. Cinturón Volcánico Transmexicano (CVTM).	45
4.2.2. Provincia Alcalina Oriental Mexicana (PAOM).	46
4.3. Construcción de Bases de datos y SIG.	47
4.3.1. Digitalización y registro.	48
4.3.2. Compendio de fichas informativas por unidad geológica.	50
4.3.3. Bancos sin unidad geológica definida.	52
4.4. Clasificación de bancos de materiales.	53
4.5. Cartografía temática y multipropósito.	55
4.6. Planeación y ejecución de inspecciones en campo.	59
4.6.1. Planificación de recorridos.	60
4.6.2. Protocolo de inspección.	60
4.7. Revisión técnica de estudios y reportes de clientes.	63
4.8. Evaluación logística y análisis de riesgos de suministro.	65
5. Resultados del análisis preliminar.	67
5.1. Panorama general de los bancos y localidades evaluadas.	67
5.2. Evaluaciones técnicas representativas.	70
5.3. Propuestas de bancos para el suministro.	73
5.4. Diagnóstico general de la disponibilidad y calidad de materiales.	73
6. Discusión y recomendaciones.	76
6.1. Oportunidades detectadas en la cadena de suministro de materiales pétreos.	76
6.2. Ventajas de la metodología aplicada.	78
6.3. Recomendaciones para optimizar la prospección y evaluación.	79
7. Conclusiones.	83
7.1. Aporte directo a los proyectos ferroviarios AIFA-Pachuca, CDMX-Querétaro y Saltillo-Nuevo Laredo.	83
7.2. Fortalecimiento metodológico y operativo.	83
7.3. Eficiencia en la prospección y reducción de costos exploratorios.	83
7.4. Validación del enfoque geológico como pilar de la evaluación de agregados.	83
7.5. Identificación de limitantes clave: logística, infraestructura y heterogeneidad litológica.	84
7.6. Necesidad de un modelo especializado para calizas.	84
7.7. Aportaciones estratégicas a la cadena de suministro de materiales.	84
7.8. Transformación del enfoque prospectivo en proyectos de infraestructura	

ferroviaria.	84
7.9. Contribución global del proyecto.	84
8. Referencias.	86

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Requisitos de calidad para los materiales que conforman la capa de terraplén (modificada de NOM-003-ARTF-2023).	15
Tabla 2. Requisitos de calidad para los materiales que conforman la capa de subrasante (modificada de NOM-003-ARTF-2023).	16
Tabla 3. Requisitos de calidad para los materiales que conforman la capa de subbalasto (modificada de NOM-003-ARTF-2023).	16
Tabla 4. Requisitos de calidad para los materiales que conforman la capa de balasto (modificada de NOM-003-ARTF-2023).	17
Tabla 5. Ensayos para evaluación de los materiales que son empleados en el balasto ferroviario para tráfico de pasajeros y mixto (modificado de ARTF, 2022).	18
Tabla 6. Características petrológicas y su impacto en las propiedades clave del balasto ferroviario.	31
Tabla 7. Propiedades físicas/mecánicas y su impacto en la calidad del balasto ferroviario.	32
Tabla 8. Propiedades de granulometría y forma y su impacto en la calidad del balasto ferroviario.	33
Tabla 9. Orden de prioridad de litologías en la selección de bancos de balasto.	34
Tabla 10. Resultados comparativos del ICPB en bancos seleccionados.	42
Tabla 11. Campos de la capa "Bancos".	49
Tabla 12. Descripción de las actividades de evaluación en campo.	61
Tabla 13. Distribución de bancos por provincia fisiográfica (dentro del área de estudio).	68
Tabla 14. Panorama general ICPB.	74
Tabla 15. Oportunidades de aprovechamiento por tipo litológico (adicional a las aplicaciones ferroviarias)	76

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Trazo del proyecto ferroviario AIFA-Pachuca. Elaboración propia a partir de cartografía INEGI (2024). Sistema de referencia: UTM Zona 14N, México ITRF 2008 (EPSG: 6369). Escala del archivo original: 1:400,000.	12
Figura 2. Trazo del proyecto ferroviario CDMX-Querétaro. Elaboración propia a partir de cartografía INEGI (2024). Sistema de referencia: UTM Zona 14N, México ITRF 2008 (EPSG: 6369). Escala del archivo original: 1:1,250,000.	13

Figura 3. Trazo del proyecto ferroviario Saltillo-Nuevo Laredo. Elaboración propia a partir de cartografía INEGI (2024). Sistema de referencia: UTM Zona 14N, México ITRF 2008 (EPSG: 6369). Escala del archivo original: 1:2,000,000.	14
Figura 4. Elementos geométricos que componen la sección transversal en balcón de la vía. Modificado de (ARTF, 2023).	15
Figura 5. Curva granulométrica del balasto No. 24. Elaborada a partir de (ARTF, 2023).	20
Figura 6. Elementos de la superestructura y subestructura ferroviarias. Elaboración propia.	27
Figura 7. Mapa general de los bancos de materiales digitalizados. Elaboración propia. Sistema de referencia: México ITRF 2008, proyección LCC (EPSG: 6372). Escala del archivo original: 1:9,000,000.	36
Figura 8. Croquis de ubicación y vista satelital de banco en Corregidora, Querétaro. Elaboración propia a partir de cartografía INEGI (2024). Sistema de referencia: UTM Zona 14N, México ITRF 2008 (EPSG: 6369). Escala del archivo original: 1:275,000.	37
Figura 9. Croquis de ubicación y vista satelital de banco en Chapa de Mota, Estado de México. Elaboración propia a partir de cartografía INEGI (2024). Sistema de referencia: UTM Zona 14N, México ITRF 2008 (EPSG: 6369). Escala del archivo original: 1:275,000.	39
Figura 10. Croquis de ubicación y vista satelital de banco en Hueypoxtla, Estado de México. Elaboración propia a partir de cartografía INEGI (2024). Sistema de referencia: UTM Zona 14N, México ITRF 2008 (EPSG: 6369). Escala del archivo original: 1:275,000.	40
Figura 11. Región de búsqueda de bancos de materiales. Elaboración propia. Sistema de referencia: México ITRF 2008, proyección LCC (EPSG: 6372). Escala del archivo original: 1:9,000,000.	43
Figura 12. Regiones ("buffers") de búsqueda para el Tren AIFA-Pachuca. Elaboración propia. Sistema de referencia: México ITRF 2008, proyección LCC (EPSG: 6372). Escala del archivo original: 1:3,250,000.	44
Figura 13. Extensión del CVTM alrededor de los proyectos AIFA-Pachuca y CDMX-Querétaro. Elaboración propia a partir de cartografía INEGI (2001, 2024). Sistema de referencia: UTM Zona 14N, México ITRF 2008 (EPSG: 6369). Escala del archivo original: 1:2,250,000.	45
Figura 14. Regiones ígneas del noreste de México y PAOM (traza parcial), correspondencia espacial con el trazo del Tren México-Nuevo Laredo (mostrado de Querétaro a Nuevo Laredo). Elaboración propia a partir de cartografía INEGI (2024). Sistema de referencia: WGS84 (EPSG: 4326). Escala del archivo original: 1:3,500,000.	47
Figura 15. Identificación de banco de materiales en la cartografía GM (SGM).	48
Figura 16. Dato puntual digitalizado en SIG.	48
Figura 17. Superposición del banco digitalizado con imagen satelital. Verificación de la existencia y estado de actividad del banco.	49
Figura 18. Tabla de atributos de la capa "Bancos" en SIG.	50

Figura 19. Ficha de evaluación del potencial técnico de la unidad “Basalto Xalapa”.	51
Figura 20. Mapa de bancos sin unidad geológica asignada. Elaboración propia a partir de cartografía geológico-minera del SGM . Sistema de referencia: México ITRF 2008, proyección LCC (EPSG: 6372). Escala del archivo original: 1:9,000,000.	52
Figura 21. Mapas de distribución de ICPB, estándar y ajustado por densidad de bancos, para el Tren CDMX-QRO. Elaboración propia a partir de cartografía geológico-minera del SGM. Sistema de referencia: México ITRF 2008, proyección LCC (EPSG: 6372). Escala del archivo original: 1:5,250,000.	53
Figura 22. Mapas de distribución de ICPB, estándar y ajustado por densidad de bancos, para el Tren Saltillo-Nuevo Laredo. Elaboración propia a partir de cartografía INEGI (2024). Sistema de referencia: UTM Zona 14N, México ITRF 2008 (EPSG: 6369). Escala del archivo original: 1:5,250,000.	54
Figura 23. Mapa litológico-fisiográfico de la subregión de búsqueda (100 km) para los segmentos 16 y 17 del Tren Saltillo-Nuevo Laredo. Distribución de bancos y tipos de rico predominantes. Elaboración propia a partir de cartografía INEGI (2024). Sistema de referencia: WGS84 (EPSG: 4326). Escala del archivo original: 1:1,200,000.	56
Figura 24. Cuadernillo de bancos (ejemplo). Lámina para un banco en Querétaro.	57
Figura 25. Mapa geológico local de un banco en Sabinas, Coahuila. Este mapa se utilizó con el fin de estimar la extensión del derrame basáltico (~100 ha) y evaluar su potencial para la producción de balasto y otros materiales pétreos. Elaboración propia basada en CETENAL (1973) y SGM (1999). Sistema de referencia: UTM Zona 14N, México ITRF 2008 (EPSG: 6369). Escala del archivo original: 1:70,000.	57
Figura 26. Comparativa entre cartografías geológicas. Se percibe una discrepancia significativa entre las rocas descritas en la región que circunda al banco (basalto y riolita-toba riolítica). Elaboración propia basada en CETENAL (1973) y SGM (1999). Sistema de referencia: UTM Zona 14N, México ITRF 2008 (EPSG: 6369). Escala del archivo original: 1:35,000.	58
Figura 27. Mapa estratégico. Evaluación de la adquisición de un predio para la producción de agregados. Al no comprobarse la continuidad del cuerpo en la propiedad, se desechó el proyecto. Elaboración propia basada en SGM (1999). Sistema de referencia: UTM Zona 14N, México ITRF 2008 (EPSG: 6369). Escala del archivo original: 1:3,750.	58
Figura 28. Mapa prospectivo (estratégico). El Cinturón de Intrusivos Candela-Monclova representa una región con alto potencial para satisfacer la demanda de materiales pétreos del Tren Saltillo-Nuevo Laredo (México-Nuevo Laredo). Elaboración propia. Arriba: Sistema de referencia: WGS84 (EPSG: 4326). Escala del archivo original: 1:600,000. Abajo: Sistema de referencia: WGS84 (EPSG: 4326). Escala del archivo original: 1:5,000,000	59
Figura 29. Ejemplo de itinerario para visita de campo.	60
Figura 30. Vista hacia el NE de un frente de explotación en un banco de Querétaro. Se identifica una falla normal que pone en contacto una lava intermedia (andesita basáltica) en el bloque de piso con una unidad volcanoclástica alterada de aspecto brechoso en el	

bloque de techo. La unidad superior contiene fragmentos angulosos de lava en una matriz rojiza de baja competencia. Ambas unidades fueron consideradas no aptas para la producción de balasto ferroviario.	62
Figura 31. Reporte de ensayos de laboratorio. El desempeño del material de este banco es desfavorable para la producción de balasto ferroviario, de acuerdo con la NOM-003-ARTF-2023 y los Lineamientos de Suministro de la ARTF.	64
Figura 32. Estudio geológico de banco en el Estado de México. Se reporta la presencia de coladas de andesita basáltica, una litología con buen potencial para la producción de balasto. No obstante, el desempeño del material en las pruebas de laboratorio fue insatisfactorio.	64
Figura 33. Ejemplo de comunicación con socios mineros. Se realizó una colaboración para evaluar los productos de la mina y se detectaron problemas en la granulometría de los agregados.	65
Figura 34. Mapa general de bancos identificados y su relación espacial con los proyectos ferroviarios México-Nuevo Laredo, CDMX-Querétaro, Saltillo-Nuevo Laredo, CDMX-Guadalajara y AIFA-Pachuca. Elaboración propia a partir de cartografía geológico-minera del SGM. Sistema de referencia: México ITRF 2008, proyección LCC (EPSG: 6372). Escala del archivo original: 1:9,000,000.	67
Figura 35. Mapa de distribución del ICPB para los trenes CDMX-Querétaro y AIFA-Pachuca. Elaboración propia. Sistema de referencia: México ITRF 2008, proyección LCC (EPSG: 6372). Escala del archivo original: 1:2,750,000.	69
Figura 36. Mapa de distribución del ICPB para el Tren Saltillo-Nuevo Laredo. Categorías de prioridad estándar y ajustada por densidad de bancos. Elaboración propia. Sistema de referencia: México ITRF 2008, proyección LCC (EPSG: 6372). Escala del archivo original: 1:3,250,000.	70
Figura 37. Frentes de explotación en el Banco A.	71
Figura 38. Mapa general de bancos por tipo roca dentro de la región de búsqueda. Elaboración propia. Sistema de referencia: México ITRF 2008, proyección LCC (EPSG: 6372). Escala del archivo original: 1:9,000,000.	74

EVALUACIÓN PRELIMINAR DE BANCOS DE AGREGADOS PÉTREOS PARA INFRAESTRUCTURA FERROVIARIA.

Resumen

El presente Informe documenta las actividades profesionales que desempeñé como **Ingeniero Geólogo y Subdirector de Plataforma** en una empresa de consultoría en el marco de proyectos estratégicos de infraestructura ferroviaria en México.

El trabajo se centra en las actividades que desarrollé para la **prospección y análisis de bancos de materiales pétreos** con potencial para el suministro de **balasto, subbalasto y capas de asiento** en tres obras prioritarias: **I. Tren AIFA-Pachuca, II. Tren CDMX-Querétaro y III. Tren Saltillo-Nuevo Laredo**, los cuales forman parte del Programa Nacional Ferroviario 2024-2030.

Como parte de mis funciones diseñé y apliqué una **metodología de evaluación multicriterio** que integró información geológica, normativa y logística, utilizando Sistemas de Información Geográfica (SIG) como herramienta principal. Dicha metodología permitió identificar bancos dentro de un radio de 250 km respecto a los trazos ferroviarios y estimar su potencial para cumplir con los requisitos técnicos establecidos en la **NOM-003-ARTF-2023**, los **Lineamientos para el suministro de balasto de la ARTF** y las **Especificaciones Técnicas** para materiales pétreos de cada proyecto.

Durante este proceso, analicé una superficie de aproximadamente **1,033,051 km²**, en la cual se registraron **1,199 bancos y minas** con alrededor de 40 litologías distintas. A partir de esta información, realicé la **valoración del potencial minero** de los bancos, considerando la **calidad potencial de los agregados**, la **ubicación estratégica**, los **costos de acarreo** y la **factibilidad operativa** de su explotación.

Este Informe pone de manifiesto no solo los resultados de dicho análisis, sino también la aplicación práctica de mis conocimientos y habilidades en un entorno profesional complejo, donde fue necesario integrar criterios técnicos con la toma de decisiones estratégicas.

1. Introducción.

1.1. Contexto profesional.

En México, el sector ferroviario se encuentra en **proceso de reactivación**, el cual es impulsado por **proyectos estratégicos de transporte de pasajeros y carga**. La importancia de esta revitalización del sector no radica solo en su contribución a la movilidad eficiente y sostenible, sino también en su capacidad para impulsar el **desarrollo regional**, fomentar la **competitividad económica** y la **reducción de emisiones de gases de efecto invernadero** frente a otros modos de transporte.

En este sentido, el 20 de noviembre de 2023 se publicó en el Diario Oficial de la Federación el **“Decreto por el que se declara área prioritaria para el desarrollo nacional, la prestación del servicio público de transporte ferroviario de pasajeros en el Sistema Ferroviario Mexicano”** (Diario Oficial de la Federación, 2023). Este documento estableció las bases normativas y de planeación para considerar al transporte ferroviario como un eje estratégico en la infraestructura nacional.

De acuerdo con la **Agencia Reguladora del Transporte Ferroviario (ARTF)** la estrategia de construcción de los proyectos ferroviarios se estructura en **cuatro fases** (Presidencia de la República, 2024):

- **Fase 1:** AIFA-Pachuca, CDMX-Querétaro, Saltillo-Nuevo Laredo y Querétaro-Irapuato.
- **Fase 2:** Querétaro-San Luis Potosí, Mazatlán-Los Mochis e Irapuato-Guadalajara.
- **Fase 3:** Guaymas-Hermosillo, Guadalajara-Tepic, San Luis Potosí-Saltillo y Los Mochis-Guaymas.
- **Fase 4:** Tepic-Mazatlán y Hermosillo-Nogales.

Estos proyectos implican la construcción de más de **3,000 km de vías férreas**, misma que se traduce en una **demanda creciente de materiales pétreos**, particularmente para la construcción de las capas de **balasto y subbalasto**, cuya calidad es crítica para garantizar la estabilidad, seguridad y durabilidad de las vías férreas.

Es importante resaltar que el balasto, además de sostener los durmientes, cumple funciones de drenaje, distribución de cargas y atenuación de vibraciones, siendo un **elemento indispensable de la ingeniería ferroviaria** (AREMA, 2021).

No obstante, en México se ha documentado una **aparente escasez de roca adecuada para producir balasto** en los volúmenes que se requieren. Este déficit llevó, por ejemplo, a la importación de material desde otros países para la construcción del Tren

Maya, lo que generó cuestionamientos sobre los costos, permisos ambientales y la sustentabilidad de la cadena de suministro (Hiriart, 2023). Bajo este panorama, la **prospección y evaluación de bancos de material** nacionales se ha convertido en una **tarea prioritaria**, tanto para asegurar el abasto como para reducir riesgos económicos y ambientales asociados a la importación.

1.2. Relación con la empresa.

Este Informe se desarrolla en el marco de las actividades profesionales realizadas para una **empresa mexicana dedicada a la elaboración de estudios interdisciplinarios en materia de movilidad, urbanismo e infraestructura**. A lo largo de su vida operativa, la empresa ha participado en proyectos de alcance nacional vinculados con el desarrollo ferroviario, destacando su reciente intervención en el desarrollo de la Ingeniería Básica de los trenes Querétaro-Irapuato, AIFA-Pachuca, entre otros proyectos.

Dentro de esta empresa, estuve a cargo de la **“Subdirección de Plataforma”** y participé en la **planeación, prospección y análisis de bancos de materiales**. Mi labor profesional incluyó, además, la integración de criterios geológicos en la estructuración de una **metodología de evaluación de bancos**, la **interpretación de pruebas de laboratorio**, la **valoración del potencial minero**, la **localización de bancos** activos e inactivos mediante SIG, la **prospección de nuevas áreas con potencial geológico**, así como la **elaboración de bases de datos y cartografía temática**.

Asimismo, contribuí en la preparación de **cuadernillos técnicos, redacción de especificaciones técnicas** de materiales (Tren CDMX-Querétaro y Tren Querétaro-Irapuato) y **desarrollo de presentaciones comerciales**, además de participar en **visitas de campo, reuniones con inversionistas, socios estratégicos y clientes**. Estas actividades se desarrollaron en un **entorno multidisciplinario**, en constante integración con ingenieros civiles, especialistas en transporte, economistas, contratistas y autoridades regulatorias.

1.3. Justificación del informe.

El presente informe responde a la modalidad de **Titulación por experiencia profesional**, prevista en la Facultad de Ingeniería de la UNAM. Su propósito es **documentar las actividades que he desarrollado como ingeniero geólogo en el ámbito de la consultoría e ingeniería ferroviaria**, demostrando la aplicación de conocimientos académicos en un contexto profesional de alta especialización.

El trabajo se sustenta en dos dimensiones complementarias:

1. **Técnica:** Durante esta experiencia profesional, pude aplicar conocimientos de geología, prospección minera y mecánica de materiales a la evaluación de bancos de roca, integrando metodologías de campo, revisión de análisis de laboratorio y uso de herramientas SIG para producir información confiable que respalde decisiones técnicas en los proyectos ferroviarios.
2. **Estratégica:** El trabajo contribuyó al fortalecimiento de la posición de la empresa en un sector clave para el desarrollo nacional, aportando insumos para la selección de bancos de suministro que optimizan recursos, reducen riesgos logísticos y mejoran la calidad de la infraestructura.

De esta forma, el Informe no solo evidencia la capacidad para analizar e interpretar información geológica y normativa, sino también para generar valor estratégico en proyectos de ingeniería/infraestructura ferroviaria, consolidando la pertinencia de la titulación profesional como ingeniero geólogo.

2. Marco contextual y normativo.

2.1. Descripción de los proyectos AIFA-Pachuca y CDMX-Querétaro.

2.1.1. Proyecto AIFA-Pachuca.

El **Tren de Pasajeros AIFA-Pachuca** es uno de los proyectos ferroviarios de mayor **prioridad estratégica para el Gobierno de México**, diseñado para conectar el Aeropuerto Internacional Felipe Ángeles (AIFA), en el Estado de México, con la ciudad de Pachuca, en el estado de Hidalgo. Su trazo alcanzará una longitud aproximada de **57 kilómetros**. El diseño contempla la construcción de una **doble vía electrificada**, con velocidad de operación de hasta **120 km/h**. El inicio de operaciones se prevé para el año **2027**, con una inversión estimada en más de **44 mil millones de pesos** (Gobierno de México, 2025) ([Figura 1](#)).

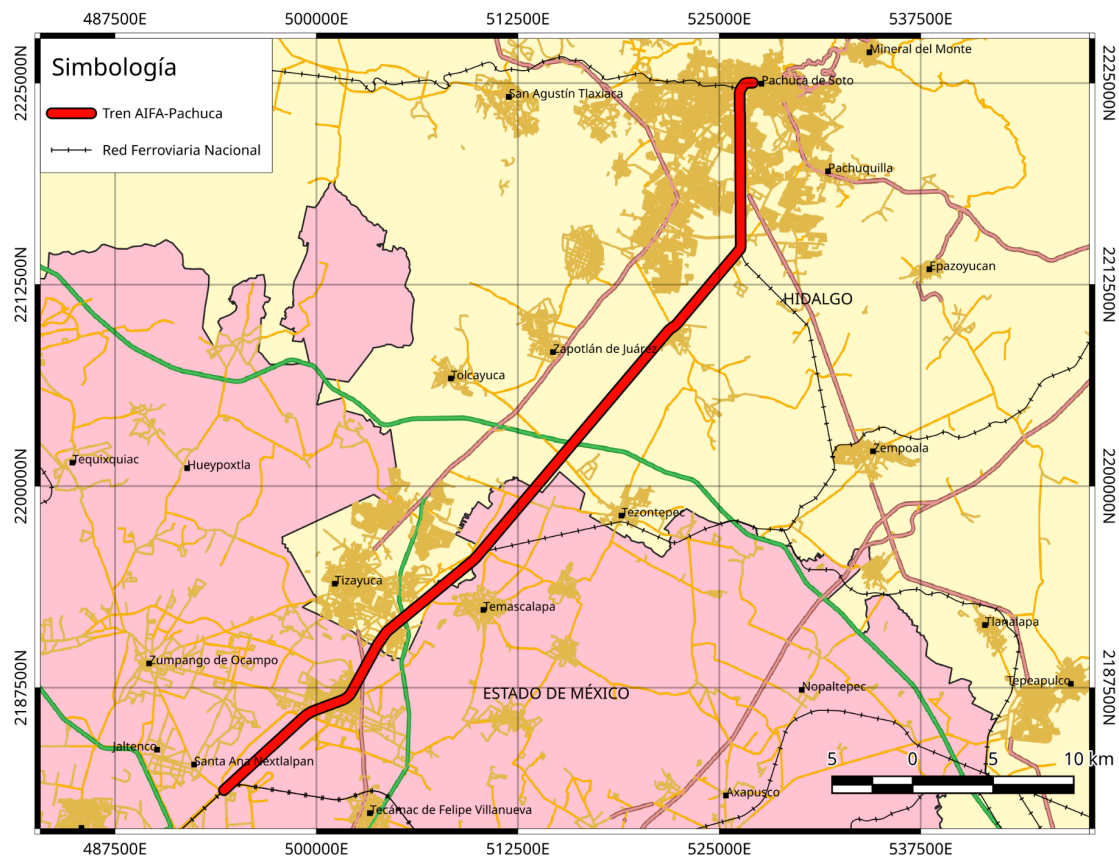


Figura 1. Trazo del proyecto ferroviario AIFA-Pachuca. Elaboración propia a partir de cartografía INEGI (2024). Sistema de referencia: UTM Zona 14N, México ITRF 2008 (EPSG: 6369). Escala del archivo original: 1:400,000.

2.1.2. Proyecto CDMX-Querétaro.

El proyecto del **Tren de Pasajeros CDMX-Querétaro** forma parte de la primera fase constructiva de un proyecto de mayor escala: el **Tren México-Nuevo Laredo**, el cual busca conectar la capital del país con su frontera noreste.

Con una longitud aproximada de **220 km**, este proyecto busca unir la Ciudad de México con Santiago de Querétaro a través de una línea de pasajeros de **doble vía** diseñada para velocidades de hasta **200 km/h**. El trazo incluye estaciones principales en Buenavista (CDMX), San Juan del Río y Querétaro, además de paraderos intermedios que atenderán a localidades a lo largo del trayecto. Se estima que las obras concluirán en **2027** y la inversión prevista asciende a aproximadamente **144 mil millones de pesos** (Gobierno de México, 2025) ([Figura 2](#)).

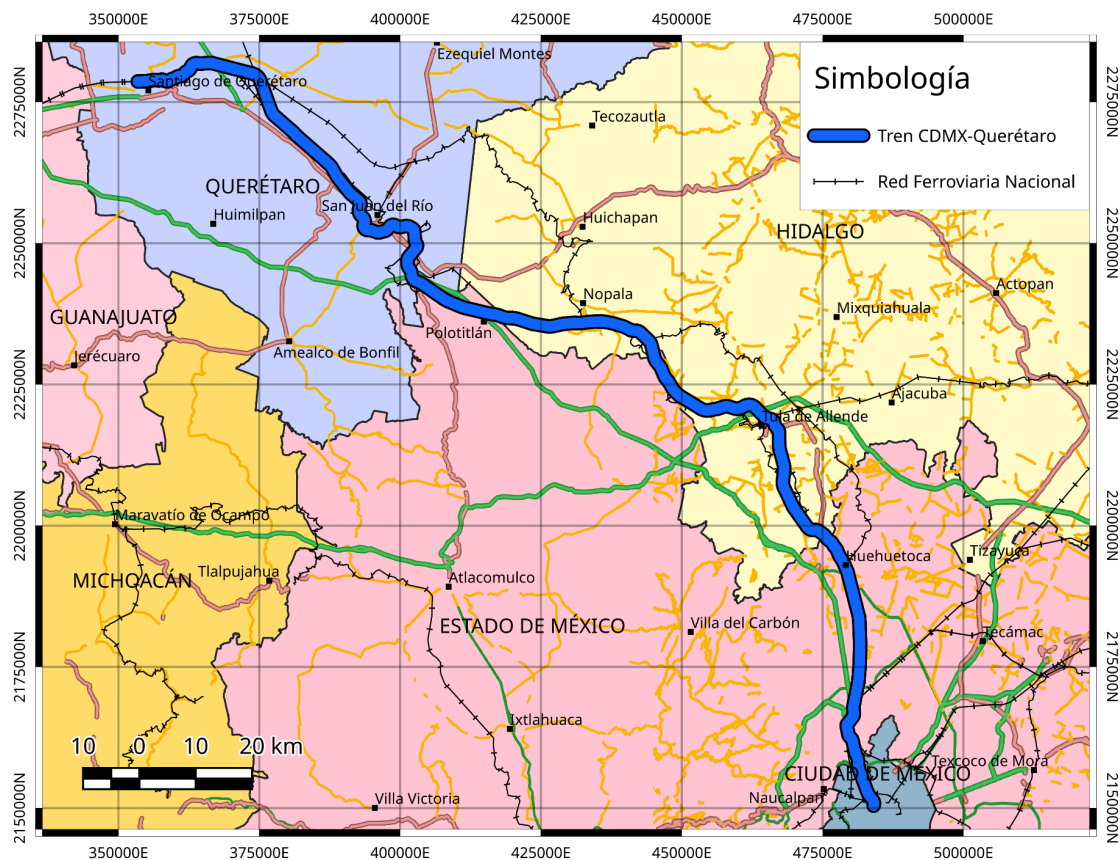


Figura 2. Trazo del proyecto ferroviario CDMX-Querétaro. Elaboración propia a partir de cartografía INEGI (2024). Sistema de referencia: UTM Zona 14N, México ITRF 2008 (EPSG: 6369). Escala del archivo original: 1:1,250,000.

2.1.3. Proyecto Saltillo–Nuevo Laredo.

El proyecto del **Tren de Pasajeros Saltillo-Nuevo Laredo** también forma parte de la primera fase de construcción del Tren México-Nuevo Laredo. De manera inmediata, este proyecto tiene como intención conectar de forma eficiente los estados de Coahuila, Nuevo León y Tamaulipas, uniendo las ciudades de Saltillo, Monterrey y Nuevo Laredo. El trazo previsto abarca aproximadamente **396 km**, con una inversión estimada en más de **138 mil millones de pesos** (Gobierno de México, 2025).

La infraestructura será de vía sencilla y, en etapas posteriores, de doble vía no electrificada, con velocidades de diseño **entre 177 y 200 km/h**.

Se planea la construcción de cinco estaciones: dos terminales en los extremos, ubicadas en Saltillo y Nuevo Laredo, así como tres estaciones intermedias en la Zona Metropolitana de Monterrey (Santa Catarina, Monterrey Centro y Monterrey Norte). La puesta en operación del servicio se proyecta hacia los años **2028-2029** ([Figura 3](#)).

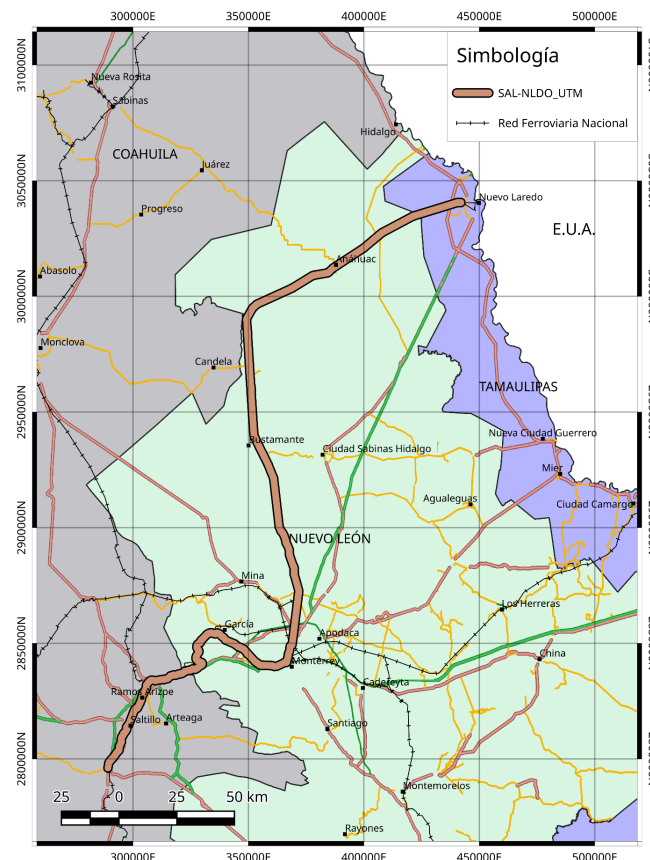


Figura 3. Trazo del proyecto ferroviario Saltillo-Nuevo Laredo. Elaboración propia a partir de cartografía INEGI (2024). Sistema de referencia: UTM Zona 14N, México ITRF 2008 (EPSG: 6369). Escala del archivo original: 1:2,000,000.

2.2. Marco normativo de los proyectos.

2.2.1. NOM-003-ARTF-2023.

La referencia normativa más importante en México en cuanto a la calidad de los materiales pétreos en vías férreas es la **NOM-003-ARTF-2023 “Sistema Ferroviario-Seguridad-Clasificación y Especificaciones de Vía”**.

En esta norma se propone una sección tipo para vías sobre balasto, en la cual definen las funciones y disposición geométrica de las capas de material pétreo ([Figura 4](#)).

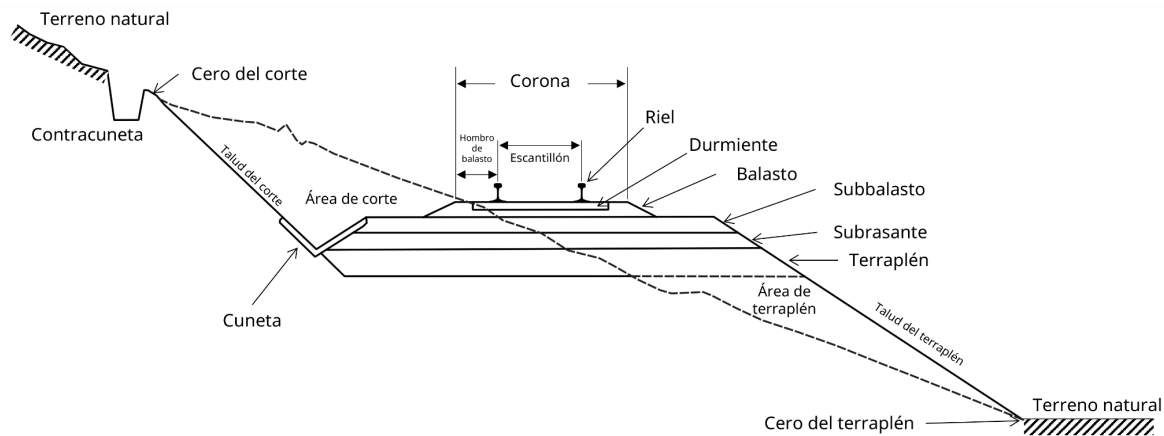


Figura 4. Elementos geométricos que componen la sección transversal en balcón de la vía. Modificado de (ARTF, 2023).

Esta norma, además, define los requisitos mínimos que deben cumplir los agregados pétreos empleados en las capas de terraplén ([Tabla 1](#)), subrasante ([Tabla 2](#)), subbalasto ([Tabla 3](#)) y balasto ([Tabla 4](#)), con el fin de garantizar su durabilidad, estabilidad y desempeño bajo condiciones de servicio tanto en trenes de pasajeros como de carga.

Tabla 1. Requisitos de calidad para los materiales que conforman la capa de terraplén (modificada de NOM-003-ARTF-2023).

Prueba	Intervalo de aceptación
Límite líquido (%)	≤ 50
Valor Soporte de California (CBR) (%)	> 5
Expansión (%)	> 5

Grado de compactación (%)	> 100±2
---------------------------	---------

Tabla 2. Requisitos de calidad para los materiales que conforman la capa de subrasante (modificada de NOM-003-ARTF-2023).

Prueba	Intervalo de aceptación
Tamaño (mm)	≤ 76
Límite líquido (%)	≤ 50
Índice plástico (%)	> 5
Valor Soporte de California (CBR) (%)	> 20
Expansión (%)	> 5
Grado de compactación (%)	> 100±2

Tabla 3. Requisitos de calidad para los materiales que conforman la capa de subbalasto (modificada de NOM-003-ARTF-2023).

Parámetro	Intervalo de aceptación (según ejes equivalentes, ΣL)	
	ΣL<10 ⁶	ΣL≥10 ⁶
Límite líquido (%)	< 30	< 25
Índice plástico (%)	< 10	< 6
Valor Soporte de California (CBR) (%)	≥ 50	≥ 60
Equivalente de arena (%)	≥ 30	≥ 40
Desgaste de Los Ángeles (%)	< 50	< 40
Grado de compactación	< 100	< 100

Tabla 4. Requisitos de calidad para los materiales que conforman la capa de balasto (modificada de NOM-003-ARTF-2023).

Propiedades	Material de balasto				
	Granito y basalto	Cuarcita	Caliza	Dolomía	Prueba ASTM
Porcentaje de material que pasa el tamiz No. 200 (%)	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0	C 117
Gravedad específica granel	≥ 2.60	≥ 2.60	≥ 2.60	≥ 2.65	C 127
Porcentaje de absorción (%)	< 1.0	< 1.0	< 2.0	< 2.0	C 127
Trozos de arcilla y partículas desmenuzables (%)	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	C 127
Desgaste de Los Ángeles (%)	< 35 %	< 30 %	< 30 %	< 30 %	(*)
Intemperismo acelerado (%)	< 5.0 %	< 5.0 %	< 5.0 %	< 5.0 %	C 88
Partículas planas o alargadas (%)	< 5.0 %	< 5.0 %	< 5.0 %	< 5.0 %	D 4791 (Método A)
(*) a) ASTM C 535: Materiales degradados que contienen partículas retenidas en el tamiz de 25 mm (1 in). b) ASTM C 131: Materiales que tienen granulometrías con 100 % que pasan el tamiz de 25 mm (1 in).					

Es importante mencionar que la NOM-003-ARTF-2023 establece **parámetros mínimos de aceptación para los materiales pétreos**, lo cual resulta suficiente para sistemas de carga pesada, pero **no necesariamente asegura el nivel de desempeño óptimo requerido en los trenes de pasajeros** de alta frecuencia y velocidad.

2.2.2. Lineamientos de suministro de balasto ARTF.

La **ARTF** es un órgano desconcentrado de la SICT cuyo objetivo es “regular la construcción, operación, conservación y mantenimiento de la estructura ferroviaria” (ARTF, 2021).

En 2022, y como parte de sus atribuciones establecidas en la Ley Reglamentaria del Servicio Ferroviario, la ARTF publicó los **“Lineamientos para los materiales que son empleados en el balasto ferroviario para tráfico de pasajeros y mixto”**, con la intención de definir las metodologías de muestreo y ensayo de los materiales usados como balasto, haciendo énfasis en proyectos de pasajeros ([Tabla 5](#)).

Este documento enfatiza la importancia que tiene la calidad del balasto para el funcionamiento óptimo de las vías férreas. **La observancia de estos Lineamientos es obligatoria para concesionarios y permisionarios de los servicios ferroviarios.**

Tabla 5. Ensayos para evaluación de los materiales que son empleados en el balasto ferroviario para tráfico de pasajeros y mixto (modificado de ARTF, 2022).

Prueba	Criterio de aceptación	Norma de referencia
A. Análisis petrográfico	Rocas clasificadas como: Granito, basalto y cuarcita. (además de caliza y dolomía en Tabasco, Campeche, Yucatán y Quintana Roo)	NMX-C-265-ONNCCE-2010
B. Difracción de Rayos X (dolomías) (%)	$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2 \geq 50$	Sin referencia
C. Prueba de granulometría	Categorías 24, 25, 3, 4A, A y B	NMX-C-077-ONNCCE-2019
D. Porcentaje de material que pasa por la malla No. 200 (%)	≤ 1.00	NMX-C-084-ONNCCE-2018
E. Trozos de arcilla y partículas desmenuzables (%)	< 0.5	NMX-C-071-ONNCCE-2004
F. Desgaste de Los Ángeles (CLA) (%)	Vías Clase 5 e inferiores: ≤ 35 Vías Clase 6 y superiores: ≤ 18	NMX-C-196-ONNCCE-2010
G. Densidad relativa (DR_b) y absorción de agua (a)	Granito, basalto, cuarcita: $\text{DR}_b \geq 2.6$, a $\leq 1\%$ Caliza: $\text{DR}_b \geq 2.6$, a $\leq 2\%$ Dolomía: $\text{DR}_b \geq 2.65$, a $\leq 2\%$	NMX-C-164-ONNCCE-2014
H. Intemperismo acelerado (%)	$\leq 5\%$ (sulfato de sodio a 5 ciclos) $\leq 4\%$ (sulfato de magnesio a 10 ciclos)	NMX-C-075-ONNCCE-2018

I. Partículas alargadas y/o planas (%)	$\leq 5 \%$	Sin referencia
J. Espesor mínimo de elementos granulares (C) (%)	$C \leq 39.5 \%$ - CLA (CLA $\leq 27 \%$)	Sin referencia
K. Resistencia a la compresión (kg/cm ²)	≥ 1000	Sin referencia
L. Radar de penetración terrestre (GPR)	Aprobación de conformidad (ARTF/Organismo de Evaluación de la Conformidad)	Sin referencia

Estos Lineamientos buscan **aumentar la exigencia sobre la calidad de los materiales pétreos para proyectos ferroviarios de pasajeros** y, en consecuencia, garantizar la seguridad operativa, reducir la frecuencia e intensidad de las labores de mantenimiento e incrementar la vida útil de la vía. Para conseguir lo anterior, fueron tomadas algunas consideraciones:

- **Introducción del análisis petrográfico** como herramienta de evaluación de los agregados.
- **Restricción de los materiales a litologías asociadas con un mejor desempeño en servicio** (granito, basalto y cuarcita, además de caliza y dolomía en el sureste de México ante la escasez de rocas ígneas en la región).
- **Reducción del nivel de desgaste por abrasión máximo permisible** en vías de Clase 6 (con velocidad máxima de diseño de 177 km/h en trenes de pasajeros).
- **Implementación de la prueba de Resistencia a la Compresión Simple** como criterio de evaluación del material.
- **Selección preferencial de dolomías sobre calizas** como material para balasto (en tanto que suelen presentar mayor densidad, resistencia a la abrasión y menor solubilidad).

2.2.3. Especificación Técnica de balasto: AIFA-Pachuca.

Cada uno de los proyectos considerados en el presente Informe cuenta con Especificaciones Técnicas (ET) propias. Dichas ET establecen **criterios específicos basados en la normativa**, para los materiales pétreos requeridos, así como parámetros de construcción, control de calidad y procesos de supervisión.

La revisión de Especificaciones Técnicas en **este documento se limita al análisis de aquellas relacionadas con la calidad de materiales para balasto**, bajo el principio de

que sus criterios de aceptación son los más exigentes y, por tanto, al ser un material aprobado como balasto existe alta probabilidad de que pueda utilizarse en el resto de las capas.

De manera específica, los criterios de evaluación de la ET para balasto en el Tren AIFA-Pachuca se apegan a los Lineamientos de suministro de la ARTF casi en su totalidad. No obstante, sin incurrir en incumplimiento y buscando asegurar la calidad de los materiales, esta ET contempla los ajustes siguientes:

- **Restricción de la granulometría aceptable** para balasto al tamaño No. 24 de manera exclusiva ([Figura 5](#)).

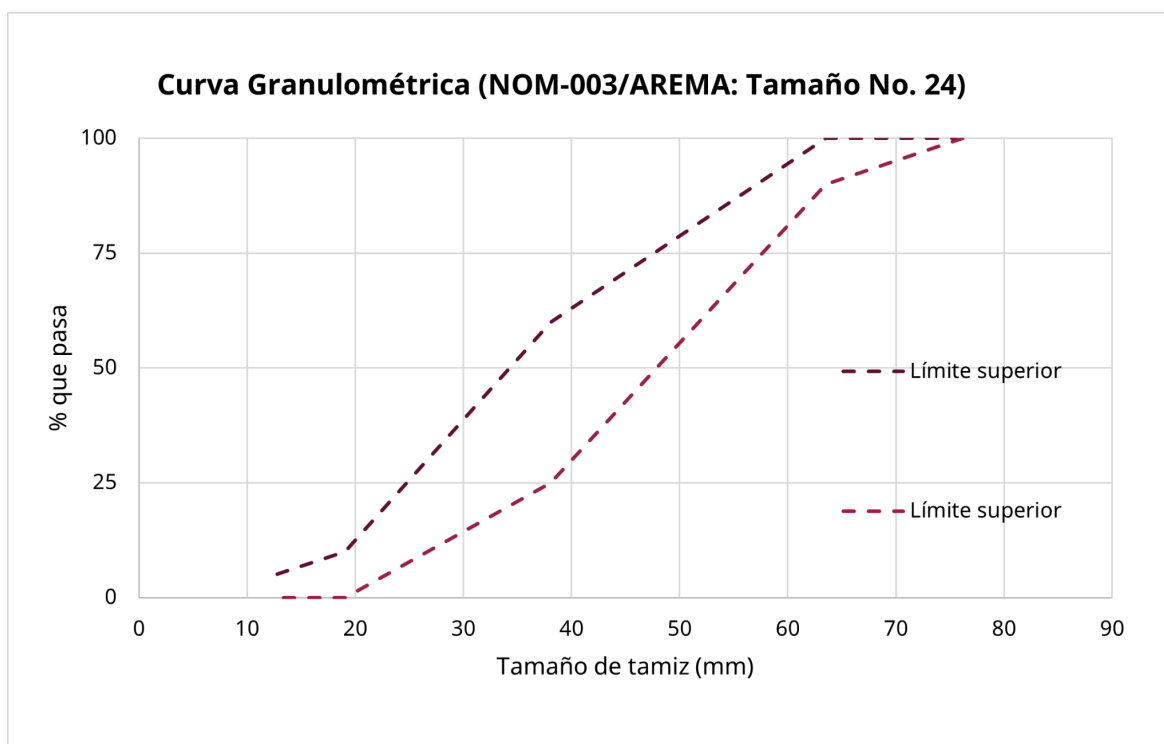


Figura 5. Curva granulométrica del balasto No. 24. Elaborada a partir de (ARTF, 2023).

- **Reducción del nivel máximo aceptable de desgaste por abrasión (CLA)** a menos de 18 % para todo el proyecto.

2.2.4. Especificación Técnica de balasto: CDMX-Querétaro.

De manera similar, los requisitos de calidad establecidos en la ET de balasto para el Tren CDMX-Querétaro se apegan casi por completo a los de los Lineamientos de la ARTF. Las

modificaciones respecto de los Lineamientos son virtualmente idénticas a las realizadas para el Tren AIFA-Pachuca e implican una **calidad superior a la mínima establecida**:

- **Restricción a la distribución del tamaño de partícula** (se acepta exclusivamente el tamaño No. 24)
- **Reducción del nivel máximo aceptable de desgaste por abrasión** (CLA máximo de 18 %).

2.2.5. Especificación Técnica de balasto: Saltillo-Nuevo Laredo.

La ET de este proyecto se apega casi en su totalidad a los valores mínimos de calidad establecidos en la NOM-003-ARTF-2023 y difiere de los Lineamientos de la ARTF en tanto que **admite un nivel de desgaste por abrasión sensiblemente mayor** (de hasta 35 % para granitos y basaltos) para todo el proyecto.

No obstante, a pesar de la mayor flexibilidad de esta ET, la prospección y selección de bancos de materiales continuarán su desarrollo en atención a los parámetros establecidos por la ARTF en sus Lineamientos (CLA<18 %).

3. Perfil de la empresa y rol profesional.

3.1. Especialización y servicios de la empresa.

La empresa se caracteriza por su enfoque multidisciplinario y por ofrecer servicios técnicos especializados en las áreas de **ingeniería, planeación urbana y consultoría estratégica**. Su experiencia abarca tanto la etapa de diseño y planeación como la supervisión y seguimiento de proyectos de infraestructura a nivel nacional.

En el ámbito de la **ingeniería de transporte y movilidad**, ha desarrollado estudios orientados a la optimización de sistemas de transporte masivo, priorizando la integración operativa entre distintos modos y la eficiencia en la gestión de la infraestructura. Destaca, en particular, la **ingeniería ferroviaria**, dentro de la cual la empresa participa en el diseño, modernización y mantenimiento de vías férreas, aplicando metodologías de análisis técnico y normativo de acuerdo con los estándares nacionales e internacionales.

De manera complementaria, cuenta con capacidades en **geomática y análisis espacial**, mediante el uso de cartografía digital, fotogrametría y sistemas de información geográfica (SIG), herramientas que permiten generar diagnósticos precisos y mapas temáticos para la planeación y gestión territorial.

Asimismo, ofrece **servicios ambientales y de planeación urbana**, orientados a garantizar la viabilidad técnica, social y ecológica de los proyectos. Estos servicios incluyen la elaboración de estudios de impacto ambiental, ordenamiento territorial y diseño de soluciones sostenibles.

Finalmente, la empresa desarrolla **consultoría técnica especializada**, integrando componentes normativos, económicos y tecnológicos que fortalecen la toma de decisiones en proyectos de infraestructura, con criterios de seguridad, eficiencia y sostenibilidad.

3.2. Funciones como Ingeniero Geólogo / Subdirector de Plataforma.

Mi labor como Ingeniero Geólogo ha implicado la integración de competencias técnicas, estratégicas y de gestión de información. Estas funciones pueden agruparse en **cuatro ámbitos**:

- I. Diseño técnico y metodológico,
- II. Prospección y análisis de bancos de material,

- III. Elaboración de productos técnicos de apoyo a la toma de decisiones, y
- IV. Participación en procesos estratégicos de gestión.

3.2.1. Diseño técnico y consolidación metodológica.

Una de las funciones centrales ha sido el desarrollo de una **metodología de evaluación de bancos de material** con fines prospectivos y comparativos.

Esta metodología busca **aprovechar al máximo la información disponible sobre bancos de materiales en el territorio nacional** y realizar una estimación inicial de su potencial para satisfacer la demanda de agregados a los distintos proyectos ferroviarios.

El objetivo fue desarrollar un **índice de calidad cuantitativo**, con el fin de establecer un **orden de prioridad entre bancos** que permita optimizar recursos mediante la identificación oportuna de las operaciones mineras con **mayor probabilidad de cumplir con la calidad establecida en los Lineamientos de la ARTF y la demanda estimada de los proyectos ferroviarios**, haciendo más rentable y eficiente el acercamiento de la empresa a las minas.

Una labor estrechamente relacionada con el desarrollo de la metodología de evaluación fue la **definición y consolidación de la estructura técnica de un Consorcio encargado de la producción de materiales pétreos**.

Esta tarea se ha orientado a garantizar que los criterios geológicos se integren de manera transversal en todas las **fases de prospección, caracterización y explotación de bancos de materiales**, con un enfoque que combina rigurosidad científica y pertinencia práctica.

El proceso ha implicado definir áreas de trabajo del Consorcio, sus objetivos, tareas y entregables, así como establecer la **metodología de operación**, definir la interacción entre cada una de las áreas y proponer flujos de trabajo estandarizados que permitan generar información confiable entre las áreas.

3.2.2. Prospección y análisis de bancos de material.

El trabajo de prospección ha incluido la **identificación y evaluación preliminar de bancos** de materiales activos e inactivos mediante la **implementación de la metodología**, la cual contempla actividades como la **interpretación de imágenes satelitales, cartografía geológica y bases de datos geoespaciales**.

El análisis ha integrado fuentes de información diversas, tales como la cartografía geológico-minera del Servicio Geológico Mexicano (SGM), cartografía geológica, información topográfica y satelital del INEGI, artículos científicos, entre otras. A partir de esta información se han delimitado **áreas de interés** y se ha estimado su **viabilidad para la producción de balasto y subbalasto**, así como para **aplicaciones civiles** que agreguen valor a los bancos de materiales (concreto, prefabricados, asfalto).

Una vez identificados los bancos, se ha procedido a valorar su **potencial minero** a través de la recopilación y análisis de datos geológicos, resultados de pruebas de laboratorio y factores estratégicos (ubicación).

Entre estos últimos destacan las propiedades petrográficas y mecánicas de la roca, la distancia de acarreo respecto a los proyectos ferroviarios, la accesibilidad de las vías de transporte y los costos logísticos asociados. Este enfoque integral ha permitido **priorizar alternativas con mayor calidad de material**.

3.2.3. Elaboración de productos técnicos de apoyo a la toma de decisiones.

Dentro de las responsabilidades desempeñadas se ha incluido la elaboración de productos técnicos especializados que facilitan la toma de decisiones. Entre estos destacan **informes geológicos, evaluaciones técnicas, análisis de resultados de laboratorio, diagramas de flujo de trabajo, esquemas de caracterización de bancos y tablas comparativas de resultados de laboratorio**.

Asimismo, se han desarrollado **modelos preliminares de abastecimiento**, donde se integran variables técnicas, logísticas y económicas para prefigurar escenarios de explotación y suministro de materiales pétreos. Dichos documentos han servido como **insumos fundamentales en reuniones estratégicas** y han permitido sustentar, con base científica, las decisiones relacionadas con la selección de bancos y la planeación de operaciones mineras.

3.2.4. Participación en procesos estratégicos de gestión.

Finalmente, las funciones también han abarcado la **participación activa en procesos de gestión estratégica**, particularmente en la **interacción con inversionistas, autoridades y organismos reguladores**. Este rol ha requerido la preparación y presentación de información técnica accesible para públicos no especializados, resaltando el potencial

geológico de los bancos, la viabilidad económica de su explotación y la alineación con los requerimientos normativos de los proyectos ferroviarios.

La participación en estas instancias ha contribuido a **determinar la confianza en la viabilidad de los proyectos**, facilitando la toma de acuerdos entre los diferentes actores involucrados y asegurando que las decisiones estratégicas se sustenten en una base técnica sólida.

3.3. Equipo de trabajo y actores clave de interacción.

En el ejercicio de mis funciones como Subdirector de Plataforma conté con un **equipo de apoyo conformado por dos Ingenieros Geólogos, a quienes dirigí de manera directa**. Estos compañeros participaron activamente en la mayoría de las tareas bajo mi responsabilidad, particularmente en la elaboración de **cartografía temática**, la **integración de información geológica** y la **preparación de entregables técnicos**.

En términos jerárquicos, respondí de manera directa ante la **Dirección de Plataforma y Vía**, encabezada por una Mtra. en Diseño, Construcción y Conservación de Vías Férreas, con quien mantuve una comunicación constante para la revisión de avances, validación de criterios técnicos y definición de lineamientos estratégicos en cada etapa del proyecto.

Asimismo, mantuve una relación directa con la **Dirección General** de la empresa, dado que en distintas ocasiones participé en reuniones con clientes, inversionistas y socios aportando información técnica sobre el estado de los bancos de material, su potencial minero y su viabilidad logística. Estas interacciones me permitieron alinear los aspectos geológicos y técnicos con las expectativas económicas y operativas de terceros.

Otro vínculo de trabajo relevante se dio con **socios de la empresa**, particularmente con un Lic. en Economía, con quien colaboré en la revisión continua de proyectos mineros activos y en la evaluación de bancos prospectados. Esta interacción fue importante para articular el análisis técnico con la viabilidad financiera y comercial, asegurando que las propuestas de explotación cumplieran con estándares de rentabilidad y sostenibilidad.

De manera indirecta, también estuve a cargo de **pasantes** provenientes de distintas áreas de la empresa, quienes se integraron de forma parcial a los proyectos bajo mi coordinación. Su participación representó una oportunidad para compartir conocimientos, asignar tareas de apoyo y, al mismo tiempo, fomentar su desarrollo profesional.

4. Metodología de evaluación de bancos de materiales.

4.1. Investigación documental (técnica y normativa).

La primera fase de desarrollo de la metodología consistió en una **amplia investigación documental** orientada a establecer el **marco técnico, normativo y científico**. Dicha investigación se fundamentó en tres niveles:

- Normativa nacional.
- Normativa y lineamientos internacionales.
- Literatura académica especializada.

La base de esta investigación se complementó con la **cartografía geológica y minera del Servicio Geológico Mexicano (SGM)**. El acceso a la infraestructura de información del SGM proporcionó una base de datos confiable para la cartografía y prospección.

4.1.1. Revisión de normativa ferroviaria nacional e internacional.

En el **ámbito nacional** se consultaron normas y manuales de referencia obligatoria emitidos por la ARTF y el IMT, entre los que destacan la **NOM-003-ARTF-2023**, los **Lineamientos de suministro de balasto** de la ARTF (2022), así como los **Manuales de calidad, especificaciones y métodos de prueba para materiales pétreos, suelos, bases y subbases** publicados por el IMT. Con esta normativa se definieron los parámetros mínimos de desempeño que deben cumplir los materiales destinados a balasto, subbalasto, subrasante y terraplén en México.

A **nivel internacional**, y con el fin de establecer una comparativa entre estándares, se analizaron documentos técnicos de referencia tales como el **Pliego de prescripciones técnicas generales de materiales ferroviarios** (ADIF-España, 2006), y el **Manual de Ingeniería Ferroviaria** (Manual for Railway Engineering) (AREMA, 2021), los cuales han sido referencia para las especificaciones nacionales y permiten contrastar criterios de aceptación de materiales bajo distintos contextos operativos.

4.1.2. Principio de selección del balasto como material guía en la evaluación de agregados.

El principio de selección del **balasto como material guía** en la evaluación de agregados parte de la premisa de que este material debe cumplir con los **requisitos de calidad más**

estrictos dentro de la vía férrea, debido a las elevadas cargas y esfuerzos a los que está sometido. Si un agregado satisface los estándares establecidos para el balasto, es altamente probable que también resulte adecuado para su empleo en las capas inferiores de la subestructura ferroviaria (subbalasto, subrasante y terraplén), cuyos criterios técnicos son menos exigentes ([Figura 6](#)).

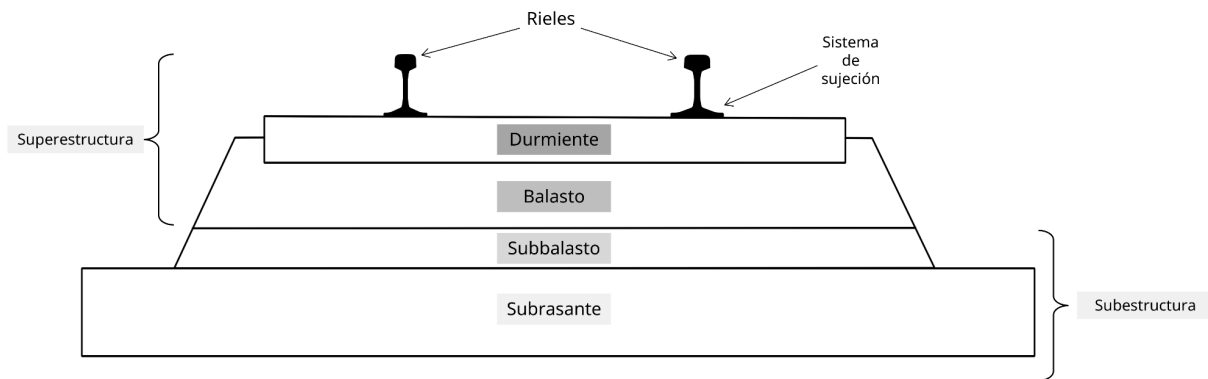


Figura 6. Elementos de la superestructura y subestructura ferroviarias. Elaboración propia.

Esta condición se explica porque el balasto constituye la **capa más expuesta a los efectos directos del tráfico ferroviario y a la acción del clima**.

En la revisión de normas mexicanas e internacionales para materiales pétreos ferroviarios, se confirma que los parámetros de aceptación más rigurosos corresponden al balasto, ya que este requiere las **propiedades más robustas en términos de durabilidad, resistencia mecánica y granulometría**.

En consecuencia, adoptar al balasto como referencia metodológica permite **simplificar y optimizar el proceso de selección de materiales**; en lugar de ensayar cada material por separado para las distintas capas, puede certificarse una fuente de alta calidad para balasto y extender su uso a la totalidad de la estructura. Esta estrategia no solo **reduce costos y tiempos de evaluación**, sino que **garantiza que las capas inferiores posean una calidad superior a la mínima exigida**, lo que se traduce en una mayor confiabilidad estructural y en una reducción significativa de las necesidades de mantenimiento a lo largo del ciclo de vida de la vía.

4.1.3. Evolución histórica en la selección de materiales para balasto.

El balasto cumple **funciones fundamentales** que garantizan la seguridad y durabilidad de la vía:

- Proporcionar resistencia y transmitir de manera uniforme los esfuerzos de los durmientes hacia el terreno,
- Asegurar la estabilidad lateral y longitudinal de la vía,
- Mantener constante la distancia entre rieles,
- Permitir un adecuado drenaje de las aguas pluviales, y
- Facilitar las labores de mantenimiento de la capa.

Existe un **consenso técnico** a nivel internacional en que un balasto de calidad, que cumpla con las funciones señaladas, debe provenir de una **roca dura**, poseer **partículas con forma angulosa**, estar **libre de finos** y **evitar procesos de cementación interna**. La experiencia histórica muestra, sin embargo, que **la disponibilidad y el costo han sido factores decisivos en su selección**, lo que ha llevado a la utilización de **materiales poco convencionales** como conchas marinas, cenizas volcánicas, arenas, escorias de fundición e incluso ladrillos triturados (Claisse y Calla, 2006).

Durante el **siglo XIX**, la elección de materiales y propiedades adecuadas para balasto se realizó principalmente de **manera empírica**. El **tamaño de partícula** fue uno de los primeros parámetros reconocidos como determinante y su valor fue ajustado en función de la facilidad del mantenimiento de la capa. En Estados Unidos, por ejemplo, hacia 1900 se emplearon partículas de **menos de 20 mm**, adecuadas para un **trabajo de mantenimiento manual intensivo**, mientras que la posterior introducción de **maquinaria especializada**, como las bateadoras, favoreció la adopción de **tamaños superiores**, llegando a partículas de hasta **80 mm** (Claisse y Calla, 2006).

Hacia finales del **siglo XIX**, la selección de balasto evolucionó hacia un **enfoque sistemático** sustentado en **pruebas físicas** aplicadas a muestras representativas. Entre las propiedades más relevantes (propiedades clave) que se comenzaron a evaluar destacan:

- Densidad (peso específico).
- Forma de las partículas.
- Dureza (resistencia a la abrasión).
- Tenacidad (resistencia a la fractura y a la compresión).

- Elasticidad.
- Permeabilidad.
- Porosidad.
- Estabilidad química.

De esta manera, y hasta la actualidad, la selección de materiales para balasto se consolidó bajo un **marco esencialmente geotécnico**, privilegiando las propiedades mecánicas de la roca, sobre todo por su carácter cuantitativo y su facilidad de normalización en manuales y especificaciones técnicas.

4.1.4. Propiedades geológicas, físico-mecánicas y granulométricas relevantes en la calidad del balasto.

En consideración de su potencial, algunos autores han investigado la relación que existe entre las **características geológicas (texturales y mineralógicas) de las rocas y el desempeño final del balasto**:

- **Watters et al. (1987):** Destacan que el desempeño de los materiales utilizados como balasto ferroviario está fuertemente condicionado por sus propiedades petrográficas, entendidas en **tres niveles jerárquicos: mineralogía, textura y estructura**. Estos factores definen la dureza efectiva de las rocas, considerada el principal (e incluso único) determinante de la durabilidad frente a los esfuerzos mecánicos, la abrasión y la meteorización. El estudio **subraya el valor del análisis petrográfico como herramienta predictiva, capaz de anticipar el comportamiento de los agregados en ensayos físicos y de identificar tempranamente posibles problemas de desempeño**. De este modo, se reconoce su utilidad no solo para el control de calidad, sino también como un método preventivo en la selección de bancos de materiales.
- **Adomako et al. (2021):** Examinan la relación entre la geología de los agregados (**mineralogía y textura**) y su **desempeño en pruebas de abrasión**, como Los Ángeles y Micro-Deval. El estudio identifica que el **contenido de cuarzo y feldespato** constituye un parámetro de referencia importante para la evaluación, aunque **advierte que la mineralogía por sí sola no basta para predecir el comportamiento mecánico de los materiales**, por lo que es indispensable considerar el papel de las **características texturales**. Dentro de estas, se destaca que las **texturas de grano fino** tienden a incrementar la resistencia al desgaste por abrasión, mientras que aquellas con múltiples modas de tamaño inducen un

interbloqueo reducido de las partículas, lo que disminuye su desempeño frente a cargas repetitivas. Asimismo, la **presencia de minerales secundarios y accesorios** influye de manera significativa en los resultados de las pruebas de abrasión, introduciendo variabilidad en el comportamiento del agregado.

- **Diógenes (2022):** Presenta un análisis detallado de **correlación entre las propiedades petrográficas, físicas y morfológicas de las rocas utilizadas como agregados**. El estudio subraya que la **mineralogía** constituye una variable petrográfica cuantitativa con gran valor predictivo respecto al comportamiento físico y morfológico de los materiales. En particular, el estudio muestra que las rocas con **mayor contenido de minerales félsicos** tienden a mostrar **menor resistencia a la degradación**. La autora enfatiza que la resistencia a la compresión de un agregado no puede explicarse a partir de una única variable petrográfica, sino que resulta del efecto combinado de diversos factores, entre los que destacan el tamaño y forma de los granos minerales, la textura de la roca y el tipo de contacto entre los minerales. Asimismo, identifica al **microfracturamiento intergranular no relleno** como un rasgo estructural de importancia decisiva: este se encuentra **directamente relacionado con la porosidad y la absorción del material**, mientras que guarda una relación inversa con la resistencia a la compresión simple.
- **Guo et al. (2022):** Presentan una **revisión sistemática de los criterios de selección de materiales para balasto**, poniendo énfasis en la relación entre la composición mineralógica y las propiedades petrográficas con el desempeño en servicio. El estudio **compara metodologías aplicadas en distintos países**, mostrando que existe una considerable diversidad en los enfoques normativos y técnicos empleados a nivel mundial. Asimismo, los autores **describen las ventajas y desventajas de diferentes tipos de rocas utilizados como balasto**, subrayando que la idoneidad de un material no puede evaluarse únicamente desde su resistencia mecánica, sino también en función de las condiciones ambientales y climáticas en las que se instalará la vía. Proponen, además, que el **análisis petrográfico** constituye una herramienta clave para anticipar el comportamiento del agregado, ya que **permite correlacionar de manera temprana las propiedades mineralógicas y texturales con los resultados de pruebas de laboratorio**, aportando criterios más sólidos para la selección de materiales.

Esta revisión documental permitió identificar las propiedades con mayor impacto sobre la calidad del balasto, las cuales pueden clasificarse en tres categorías:

a) Propiedades petrográficas: Mineralogía y textura.

Por una parte, **la mineralogía condiciona la dureza, densidad y resistencia del agregado**. Las rocas con alto contenido de **micas o minerales arcillosos** resultan inadecuadas, pues generan partículas frágiles y sensibles ante ciclos de expansión-contracción. De manera similar, el exceso de **sulfuros u olivino** puede originar procesos de oxidación y acidificación indeseables. Por el contrario, un mayor contenido de **minerales máficos** incrementa la resistencia a la degradación y al impacto, mientras que la presencia de **feldespatos potásicos** tiende a reducir la rugosidad superficial de las partículas.

De forma paralela, la **disposición y arreglo de las partículas en las rocas** también resultan críticos: rocas foliadas o con planos de debilidad producen partículas elongadas que favorecen la fractura bajo carga, mientras que aquellas con textura masiva o no foliada mantienen mejor su integridad estructural. Además, el **tamaño de grano** de las rocas es un factor determinante: las rocas de grano fino suelen ser más tenaces, aunque tienden a pulirse con el uso, reduciendo la fricción entre partículas; en contraste, las de grano grueso son más vulnerables a la fracturación intergranular y a la porosidad elevada. En la [Tabla 6](#) se muestra un resumen del impacto de cada propiedad sobre la calidad del balasto.

Tabla 6. Características petrológicas y su impacto en las propiedades clave del balasto ferroviario.

Propiedad	Relevancia
Composición mineralógica	Es el factor más crítico en la calidad del balasto. - Rocas con alto contenido de mica no son adecuadas: se asocian a partículas laminares, baja resistencia y fácil desintegración. - Rocas con arcillas expansivas sufren ciclos de expansión-contracción que deterioran la integridad del material. - Contenidos de sulfuros (>2%) y olivino (>5%) son inadecuados: inducen oxidación y acidificación de los agregados. - Las rocas carbonatadas se disuelven con facilidad y producen capas delgadas de material blando, mismas que son removidas por abrasión y por ciclos de congelamiento-descongelamiento, dejando expuesta nueva roca fresca que continúa intemperizándose y liberando impurezas no solubles. - Rocas con mayor proporción de minerales máficos aumentan la resistencia a la compresión y el peso específico aparente. - Predominio de cuarzo y feldespato potásico mejora la resistencia a la compresión del balasto; exceso de plagioclasa disminuye la calidad. - Existe correlación entre la presencia de feldespato potásico y partículas con baja rugosidad; en contraste, máficos generan mayor rugosidad. - Procesos de meteorización/intemperismo químico generan minerales secundarios (minerales arcillosos y óxidos), que debilitan el material. - La alteración de carbonatos y sulfuros acelera la pérdida de masa y favorece la contaminación por finos del balasto (<i>fouling</i>).
Textura	Influye en la forma, rugosidad y comportamiento mecánico del balasto. - Texturas cristalinas de baja porosidad son deseables: reducen la absorción de agua y el deterioro por intemperismo.

	- Texturas foliadas o bandeadas afectan la forma de las partículas; mayor generación de partículas planas y/o elongadas durante la trituración. - Rocas de grano medio a grueso presentan más microfracturas intergranulares, lo que aumenta la porosidad, absorción de agua y degradación bajo carga. - Texturas asociadas a baja rugosidad reducen la estabilidad de la capa de balasto.
--	--

b) Propiedades físicas/mecánicas

Las propiedades físicas y mecánicas del balasto determinan en gran medida su **comportamiento en servicio**, ya que condicionan la resistencia al desgaste, la estabilidad estructural y la generación de finos a lo largo de la vida útil de la vía férrea. En la [Tabla 7](#) se describen las más importantes:

Tabla 7. Propiedades físicas/mecánicas y su impacto en la calidad del balasto ferroviario.

Propiedad	Relevancia
Densidad	Una mayor densidad de las rocas confiere mayor resistencia y estabilidad a la capa de balasto, reduciendo la probabilidad de fractura de las partículas bajo carga repetida.
Porosidad	La porosidad tiene un efecto opuesto a la densidad: Un aumento de ésta favorece la absorción y acelera los procesos de degradación por compactación y ciclos de carga, mientras que valores bajos de porosidad suelen correlacionarse con una mayor resistencia a la compresión y mejor desempeño mecánico.
Resistencia a la compresión	Un valor elevado limita el microfisuramiento interno y permite un mejor control en la producción de finos.
Dureza	La dureza, entendida como la oposición de los granos minerales a ser rayados o desgastados, es la propiedad dominante para evaluar la durabilidad física de un agregado; en balasto, se busca siempre que sea lo más alta posible, ya que partículas blandas favorecen la rápida pérdida de volumen y el <i>fouling</i> de la capa

c) Propiedades de granulometría y forma

La forma, la angulosidad, la esfericidad y la rugosidad superficial de las partículas tienen un **impacto directo en la estabilidad geométrica de la vía** ([Tabla 8](#)). El balasto debe estar constituido por **partículas angulosas y equidimensionales**, capaces de desarrollar un sistema de interbloqueo eficiente que brinde fricción y rigidez lateral a la capa. En contraste, los granos redondeados, aun cuando generan menos finos por abrasión, producen una estructura inestable y de baja capacidad de confinamiento. Las **partículas**

elongadas son indeseables, ya que se fracturan con facilidad por flexión al ser sometidas a cargas verticales. Finalmente, una **superficie rugosa** incrementa la fricción interna, favoreciendo la estabilidad frente a desplazamientos longitudinales y laterales.

Por su parte, la **distribución de tamaños** en el balasto influye tanto en la resistencia mecánica como en la susceptibilidad a la intemperización. Un predominio de partículas finas aumenta el área superficial expuesta, acelerando procesos de meteorización química y mecánica, mientras que una fracción excesiva de partículas gruesas dificulta la compactación y reduce la uniformidad de la capa. En este sentido, los **rangos granulométricos establecidos en normas técnicas internacionales** buscan un equilibrio entre resistencia, trabajabilidad y facilidad de mantenimiento.

Tabla 8. Propiedades de granulometría y forma y su impacto en la calidad del balasto ferroviario.

Propiedad	Relevancia
Forma de partícula	Partículas equidimensionales favorecen la trabazón y la estabilidad. Partículas elongadas tienden a fracturarse bajo cargas verticales (flexión).
Angulosidad	Partículas angulosas generan mayor fricción y estabilidad en la capa. Partículas redondeadas producen una estructura inestable, aun si generan menos finos.
Rugosidad	Alta rugosidad incrementa la fricción interna y la estabilidad lateral/longitudinal de la vía. Superficies lisas reducen la capacidad de confinamiento.
Granulometría	Una distribución de tamaños adecuada equilibra la resistencia y facilidad de mantenimiento de la capa. Un exceso de finos acelera intemperización química; un exceso de gruesos dificulta la compactación y reduce la uniformidad

Cabe señalar que estas propiedades dependen en buena medida del tratamiento que se dé al material pétreo en fases posteriores de producción y trituración, motivo por el cual no se incluyeron en la construcción del índice de evaluación preliminar.

4.1.5. Jerarquía de tipos de roca según su idoneidad para balasto.

Con base en el análisis de **propiedades mineralógicas, texturales, físicas y estructurales**, así como en la revisión de estudios previos fue posible establecer un **orden de preferencia para el empleo de distintos tipos de roca como balasto** (Tabla 9). Esta jerarquía se fundamenta en la resistencia mecánica, la durabilidad frente a ciclos de meteorización y la menor propensión a generar finos durante su vida útil en servicio:

Tabla 9. Orden de prioridad de litologías en la selección de bancos de balasto.

Tipo de roca	Ventajas principales	Limitaciones y riesgos
Ígneas extrusivas (basalto, andesita, riolita)	- Alta dureza y resistencia a la abrasión. - Baja porosidad. - Buena durabilidad frente a ciclos de carga. - Excelente capacidad de interbloqueo de partículas.	- Pueden presentar vesículas o vacuolas que aumentan la porosidad.
Ígneas intrusivas (gabro, diorita, granodiorita)	- Buena resistencia mecánica. - Textura generalmente compacta.	- Mayor presencia de microfracturas intergranulares.
Metamórficas no foliadas (cuarcita)	- Dureza y resistencia al desgaste elevadas. - Buena respuesta a cargas cíclicas.	- Riesgo de planos de debilidad ocultos.
Sedimentarias carbonatadas (calizas, dolomías)	- Bajo ciertas condiciones texturales (recristalización, baja porosidad, bajo contenido de arcillas) pueden ser idóneas como balasto.	- Alta susceptibilidad a disolución y meteorización. - Menor resistencia a la abrasión. - Generación acelerada de finos. - Comportamiento muy dependiente de la textura y pureza.

Esta jerarquización no pretende ser un criterio absoluto, sino una **guía inicial para orientar la prospección y priorizar regiones con mayor potencial geológico**. En la práctica, la calidad real de un banco de materiales debe ser confirmada mediante ensayos de laboratorio y evaluaciones geotécnicas específicas.

4.1.6. Desarrollo del índice de calidad (ICPB).

El Índice de Calidad Potencial de Balasto (ICPB) se concibe como una **herramienta comparativa destinada a establecer un orden de prioridad entre bancos candidatos para el suministro de balasto**. Este índice integra tanto **variables geológicas como logísticas**, por lo que **no debe interpretarse como un indicador absoluto de calidad del material**. En consecuencia, su valor únicamente es válido para la comparación de bancos **en el marco de un mismo proyecto ferroviario**, pudiendo un banco obtener calificaciones distintas en función del trazo de referencia.

Con base en la revisión documental, se definieron los parámetros de evaluación que estructuran el ICPB. Algunos de ellos son:

- **Mineralogía:** Se enfatiza la identificación de especies mineralógicas que disminuyen la calidad del balasto.
- **Densidad relativa media:** Se descartan bancos con rocas cuya densidad es al menos un 10 % inferior al umbral de 2.6.
- **Porosidad:** Se evalúa la presencia de porosidad primaria y secundaria, dado su impacto en la durabilidad y resistencia del material.
- **Estructuras:** Se registran rasgos como estratificación, foliación, fracturas, juntas o laminación. Su influencia depende de la escala: estructuras con dimensiones o espaciamientos menores al tamaño nominal del balasto afectan negativamente su desempeño.
- **Distancia al proyecto ferroviario de referencia:** Inicialmente se considera la distancia en línea recta entre el banco y el punto más cercano del trazo. Este valor puede refinarse en función de la ubicación de acopios y de la definición de rutas de transporte.

Cada parámetro se describe de manera cualitativa o cuantitativa a partir de **datos de campo o de investigación documental**; sin embargo, el índice fue concebido como una herramienta estrictamente cuantitativa. En ese sentido, se estableció una **escala de 0 a 100 puntos**, en la que **el valor 0 representa un potencial nulo y 100 condiciones óptimas para el suministro de balasto**.

Por motivos de confidencialidad, en este documento no se detalla la metodología de transformación de información de carácter cualitativo a información cuantitativa, tampoco se muestra la expresión matemática específica de cálculo del ICPB. No obstante, su diseño responde a la integración de los criterios mencionados,

apoyada en la literatura especializada y en la experiencia práctica adquirida durante la investigación.

El valor obtenido para cada banco se almacena en la **base de datos SIG**, lo que facilita la **construcción de mapas temáticos y otros productos cartográficos** útiles en la prospección y priorización de fuentes de suministro ([Figura 7](#)).

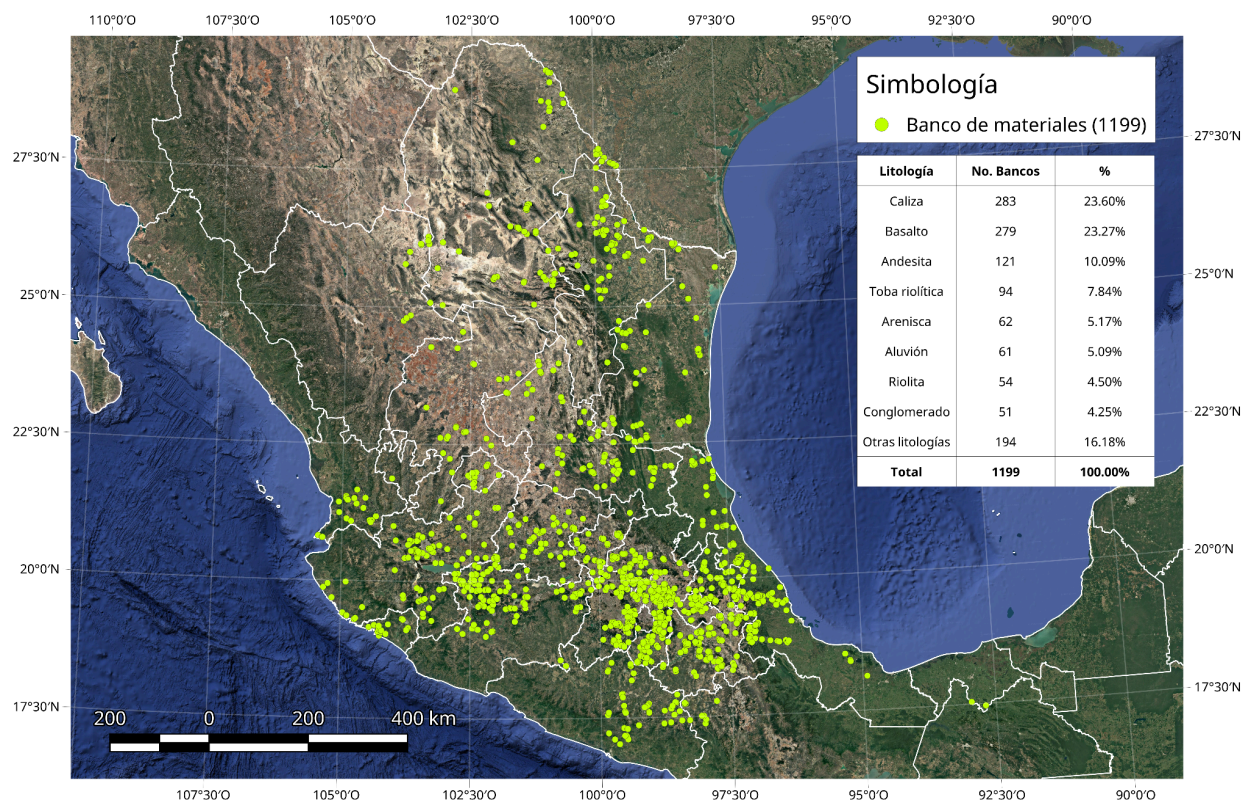


Figura 7. Mapa general de los bancos de materiales digitalizados. Elaboración propia. Sistema de referencia: México ITRF 2008, proyección LCC (EPSG: 6372). Escala del archivo original: 1:9,000,000.

Una de las principales limitaciones del ICPB radica en su **aplicabilidad reducida a las rocas carbonatadas**, en especial a las calizas. La **complejidad textural** de estas rocas exige un análisis más detallado para estimar adecuadamente su calidad potencial. Estudios como los de Andrade et al. (2024) han evaluado el **comportamiento de calizas utilizadas como balasto** mediante pruebas de trituración, ensayos triaxiales, pruebas de resistencia a cargas cíclicas y caracterización morfológica. Sin embargo, estos trabajos **suelen omitir descripciones petrográficas detalladas**, pese a la alta variabilidad textural de las calizas y su influencia decisiva en el desempeño mecánico. **Esta omisión limita la extrapolación de resultados y subraya la necesidad de un enfoque petrográfico complementario en la evaluación de tales materiales.**

4.1.7. Ejemplos de aplicación del ICPB.

Como **ejercicio ilustrativo**, se aplicó el Índice de Calidad Potencial de Balasto en la evaluación de diversos bancos de materiales:

a) Banco en Corregidora, Querétaro.

Este banco fue evaluado como fuente potencial de suministro para el **proyecto ferroviario CDMX-Querétaro**. La instalación se ubica en la zona limítrofe con el estado de Guanajuato ([Figura 8](#)).

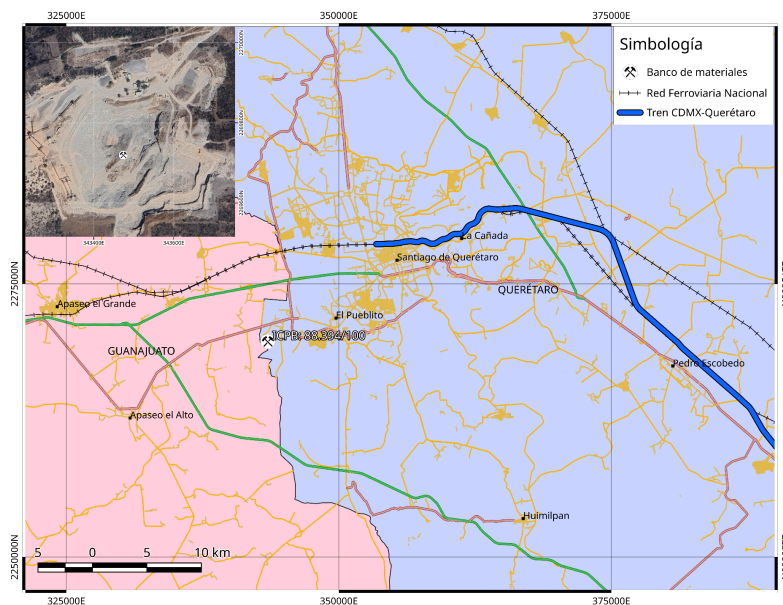


Figura 8. Croquis de ubicación y vista satelital de banco en Corregidora, Querétaro. Elaboración propia a partir de cartografía INEGI (2024). Sistema de referencia: UTM Zona 14N, México ITRF 2008 (EPSG: 6369). Escala del archivo original: 1:275,000.

Desde el punto de vista geológico, el yacimiento se localiza dentro de la porción **norte-central del Cinturón Volcánico Transmexicano (CVTM)**, específicamente en el **Valle de Querétaro**, una fosa tectónica de origen distensivo asociada a los sistemas de fallas **Taxco-San Miguel de Allende** y **Chapala-Tula**. Este sistema estructural define un relieve de fosas y pilares, donde los rellenos aluviales y volcanoclásticos alternan con derrames de lava andesítica y basáltica (Aguirre-Díaz et al., 2000).

En el área inmediata a la planta afloran **lavas de andesita basáltica del Mioceno (~14 Ma)**, correspondientes a la unidad **TmA-B** descrita en la **Carta Geológico-Minera "Querétaro" (F14-10)** (SGM, 1999). Estas lavas representan las primeras manifestaciones

volcánicas del sector central del CVTM (Ferrari et al., 2012) y se asocian al desarrollo de estratovolcanes como **El Zamorano, La Joya y Palo Huérfano**. En la zona, las rocas son atribuibles al antiguo **volcán Cimatario**, caracterizado como un volcán escudo erosionado, con derrames de lava de baja viscosidad y gran extensión lateral (~10 km) (Hernández-Rojas, 2007).

El material dominante corresponde a **andesitas y basaltos compactos**, de color gris oscuro, textura porfírica y **escasa alteración**, con presencia de plagioclasa, piroxeno y magnetita. Solo se observa **ligera oxidación superficial**, sin afectación significativa a la matriz. La **densidad media estimada** es de aproximadamente **2.85–2.95 g/cm³**, con **porosidad baja** y estructuras masivas sin fracturación visible relevante. Estas propiedades confirman su **idoneidad como fuente de balasto**, siempre que se controle la explotación para evitar contaminación con unidades sedimentarias adyacentes.

En cuanto a infraestructura, el análisis satelital y la inspección técnica evidencian una **operación minera consolidada**, equipada con **maquinaria moderna y trenes de trituración de alta capacidad**, en funcionamiento continuo. Los **accesos no pavimentados** se encuentran en buen estado y debidamente señalizados, lo que garantiza una **logística eficiente** de producción y transporte.

Por su composición geológica, su nivel de desarrollo operativo y su **proximidad al trazo del proyecto ferroviario (~10 km)**, el banco presenta condiciones **altamente favorables para su uso como fuente de balasto**. La aplicación del ICPB arrojó una **puntuación global de 88.394/100**, lo que lo ubica dentro de la categoría de **prioridad media**, es decir, se trata de un candidato atractivo para el suministro de materiales en el corredor CDMX–Querétaro.

b) Banco en Chapa de Mota, Estado de México.

El segundo caso corresponde a un banco localizado en Chapa de Mota, Estado de México ([Figura 9](#)). Este banco fue evaluado como posible proveedor de balasto y otros materiales pétreos para el proyecto ferroviario **AIFA-Pachuca**.

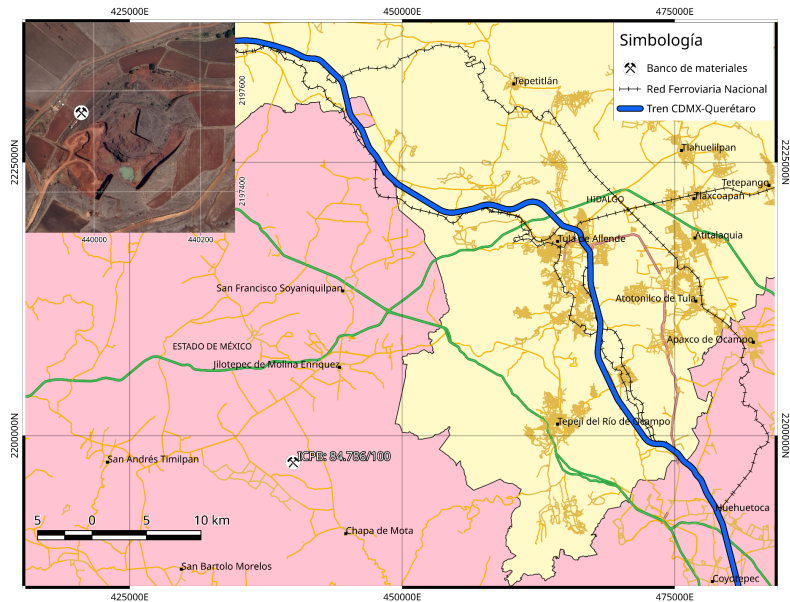


Figura 9. Croquis de ubicación y vista satelital de banco en Chapa de Mota, Estado de México. Elaboración propia a partir de cartografía INEGI (2024). Sistema de referencia: UTM Zona 14N, México ITRF 2008 (EPSG: 6369). Escala del archivo original: 1:275,000.

De acuerdo con la información cartográfica, las rocas del banco se corresponden con la unidad geológica denominada **"Basalto Metates"**, constituida principalmente por **rocas basálticas de origen extrusivo**. En términos generales, esta unidad presenta un **alto potencial para uso como balasto**, dado que los basaltos y andesitas asociados se distinguen por su alta densidad, resistencia mecánica y durabilidad. Sin embargo, la **presencia local de materiales tobáceos constituye un factor limitante** que debe ser considerado en la explotación selectiva.

Las lavas del Basalto Metates han sido descritas como masivas y frecuentemente vesiculadas (Soler-Arechalde, 1990). La densidad típica de estas rocas varía entre **2.8 y 3.0 g/cm³**, mientras que la **porosidad es baja a moderada debido a la existencia de vesículas**. Esta característica textural, si bien no compromete de manera absoluta la calidad, constituye un elemento estructural que podría reducir la durabilidad en servicio.

En términos de logística y ubicación, la **distancia mínima entre el banco y el trazo ferroviario AIFA-Pachuca es de aproximadamente 56 km**, lo que representa una **ventaja significativa** al reducir costos de transporte frente a bancos más distantes.

La aplicación del ICPB a este banco arrojó una puntuación global de **84.786/100**, lo que lo clasifica dentro de la categoría de banco de **prioridad media**, apto para ser considerado como fuente potencial de suministro de balasto para el proyecto ferroviario.

c) Banco en Hueypoxtla, Estado de México.

El tercer caso corresponde a un banco localizado en el municipio de **Hueypoxtla, Estado de México** (Figura 10), evaluado como fuente potencial de suministro para el **proyecto ferroviario AIFA-Pachuca**.

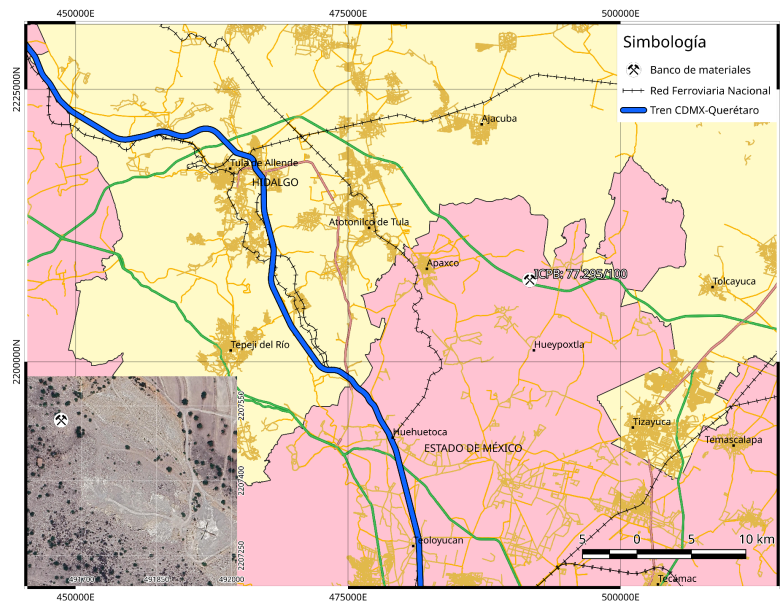


Figura 10. Croquis de ubicación y vista satelital de banco en Hueypoxtla, Estado de México. Elaboración propia a partir de cartografía INEGI (2024). Sistema de referencia: UTM Zona 14N, México ITRF 2008 (EPSG: 6369). Escala del archivo original: 1:275,000.

A diferencia de los casos anteriores (dominados por rocas volcánicas del CVTM), este banco está constituido por **rocas sedimentarias del Cretácico**, principalmente **calizas y margas**, asignadas a la **unidad KaceCz-Mg** de la **Carta Geológico-Minera E14-2 "Tulancingo"** (SGM, 1999).

Litológicamente, estas rocas se asocian con la **Formación Tamabra**, la cual representa depósitos marinos de plataforma y talud desarrollados en el margen suroriental de la **Plataforma Carbonatada Valles-San Luis Potosí**, en transición hacia la **Cuenca Mesozoica del Centro de México**. El ambiente de sedimentación de esta formación fue complejo, combinando **regímenes autóctonos de aguas profundas** con **regímenes alóctonos de plataforma somera**, lo que dio origen a una notable **heterogeneidad litológica** (López-Doncel, 2003).

Estas condiciones dieron origen a cuerpos de **brecha con intraclastos calcáreos-arcillosos, calizas laminadas intercaladas con lutitas calcáreas, microbrechas con nódulos de pedernal y calizas arcillosas con fragmentos de fauna arrecifal**. Esta variabilidad, aunada a procesos diagenéticos diferenciales, genera **cambios marcados en la resistencia y durabilidad del material**.

Desde el punto de vista operativo, la mina cuenta con una **infraestructura básica adecuada** para el desarrollo de actividades mineras. Los **camino de terracería**, en buen estado, facilitan el acceso y el transporte del material hacia los proyectos ferroviarios cercanos, y existe **suministro eléctrico** suficiente para el funcionamiento de la maquinaria. No obstante, se identificó una **limitante importante en el abastecimiento de agua**, derivada de la ubicación remota del yacimiento, lo que podría implicar costos adicionales para el transporte o almacenamiento del recurso. En materia de recursos humanos, el personal necesario podría reclutarse entre las **localidades aledañas**, donde existe experiencia previa en labores extractivas.

El **análisis geológico** muestra que el material disponible **no resulta idóneo para las capas de balasto y subbalasto**, debido a su **baja resistencia al desgaste y la meteorización**, así como a su **susceptibilidad a la disolución** en presencia de agua. Estas características son comunes en calizas y margas con alto contenido de carbonato de calcio y arcillas, cuya respuesta mecánica es variable y dependiente del grado de recristalización y compactación.

Sin embargo, para **capas inferiores de la subestructura ferroviaria**, como la **subrasante o el terraplén**, el material podría considerarse **moderadamente viable**, siempre que se verifique el cumplimiento de los **parámetros normativos de plasticidad, CBR y contenido de finos**. Se recomienda realizar una **evaluación complementaria de comportamiento volumétrico y durabilidad química**, especialmente para prevenir procesos de desintegración o formación de productos expansivos.

A pesar de sus limitaciones litológicas, la **ubicación estratégica** del banco (cercana a las obras ferroviarias del centro del país) representa una **ventaja logística significativa**, al reducir los costos de transporte y facilitar la movilización del material. No obstante, su **uso debe realizarse bajo supervisión técnica rigurosa**, priorizando el control de calidad en todas las etapas de extracción, trituración y clasificación.

La aplicación del **Índice de Calidad Potencial de Balasto (ICPB)** a este banco arrojó una **puntuación de 77.295/100**, clasificándolo como un banco de **prioridad baja**, con potencial limitado para el balasto, pero con **viabilidad parcial** para otras capas estructurales de la vía férrea.

A pesar del resultado obtenido, es importante subrayar que **el valor del ICPB (77.295/100) podría sobrestimar parcialmente el potencial real del banco**, dado que el modelo de ponderación del índice se diseñó principalmente con base en el comportamiento de rocas ígneas y metamórficas, cuyas propiedades mecánicas son más uniformes y predecibles. Como se ha mencionado, en el caso de las rocas carbonatadas, **el impacto de sus características texturales y microestructurales no se refleja de manera completa en la estimación del índice.**

Estos factores pueden afectar significativamente la **resistencia a la abrasión, la durabilidad y la estabilidad volumétrica** del material, incluso cuando otros parámetros (densidad, homogeneidad o logística) resultan favorables. En consecuencia, el **ICPB debe interpretarse con precaución** para este tipo de litologías, complementándose siempre con **ensayos petrográficos detallados y pruebas físico-mecánicas específicas** que permitan determinar con mayor precisión su comportamiento en servicio.

d) Comparativa entre bancos.

La aplicación del **Índice de Calidad Potencial de Balasto (ICPB)** en los tres casos seleccionados permitió **validar su utilidad como herramienta comparativa** para jerarquizar bancos con base en sus propiedades geológicas, físicas y logísticas. Los resultados se presentan en orden descendente de calificación, reflejando distintos niveles de calidad potencial y condiciones de aprovechamiento ([Tabla 10](#)).

Tabla 10. Resultados comparativos del ICPB en bancos seleccionados.

Banco	Proyecto asociado	Litología dominante	Densidad (g/cm ³)	Porosidad	Distancia al trazo (km)	ICPB/100	Prioridad
Corregidora	CDMX-Querétaro	Andesita basáltica compacta	2.85-2.95	Baja	~10	88.394	Media
Chapa de Mota	AIFA-Pachuca	Basalto con vesículas	2.8-3.0	Baja-moderada	~57	84.786	Media
Hueypoxtla	AIFA-Pachuca	Caliza y marga	2.65	Media-alta	~40	77.295	Baja

4.2. Identificación y clasificación de zonas con potencial geológico para la producción de agregados (ejemplos).

La identificación de **zonas con potencial para la producción de agregados pétreos** se fundamentó en la **interrelación entre los trazos ferroviarios y el contexto geológico regional y local de su entorno**.

A partir de esta base, se evaluaron los **parámetros litológicos y mineralógicos**, así como propiedades físicas de las rocas (porosidad, densidad media y presencia de estructuras) que inciden directamente en su viabilidad.

Para esta labor se recurrió a una combinación de **fuentes documentales y cartográficas, artículos científicos, tesis y fichas técnicas**, además de **bases de datos especializadas** como el Léxico Estratigráfico Mexicano. La cartografía utilizada incluyó las Provincias fisiográficas de México y las Cartas Geológico-Mineras a escalas 1:250,000 y 1:50,000 publicadas por el SGM. Estas fueron complementadas con imágenes satelitales y, en casos puntuales, con datos de campo obtenidos tanto por trabajo propio como mediante la comunicación directa con socios estratégicos.

La **delimitación espacial** se estableció en un radio de **250 km alrededor de los trazos ferroviarios de interés**, lo que corresponde a una superficie aproximada de **1,033,051 km²** (Figura 11).

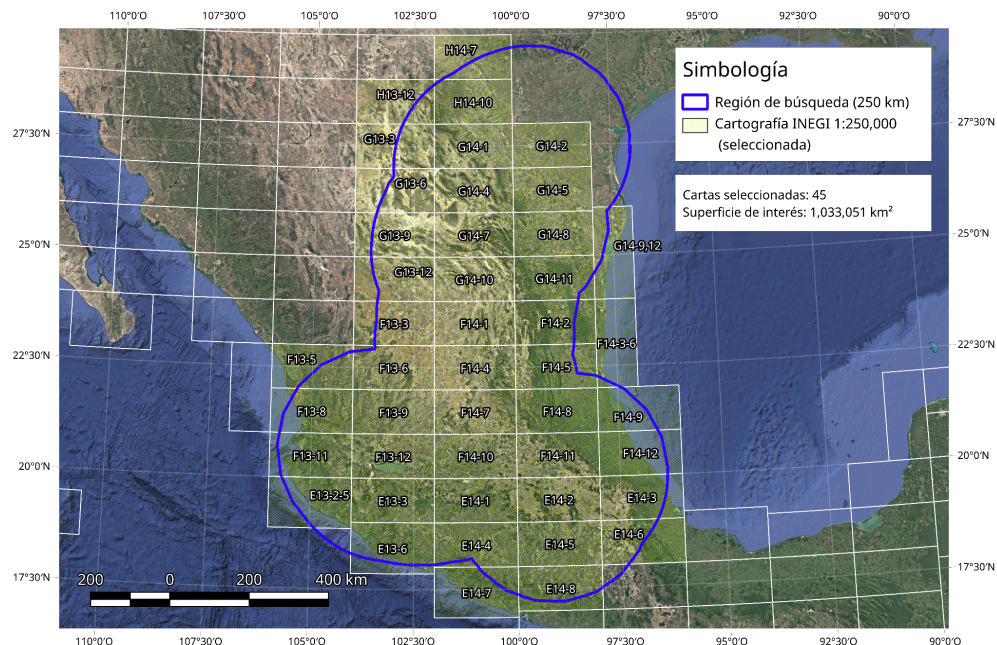


Figura 11. Región de búsqueda de bancos de materiales. Elaboración propia. Sistema de referencia: México ITRF 2008, proyección LCC (EPSG: 6372). Escala del archivo original: 1:9,000,000.

Dentro de este ámbito, las zonas se organizaron en función de **dos criterios principales**:

1. **Proximidad logística.** Se consideraron distancias de 250 km, 100 km, 50 km, 20 km y 10 km respecto a los proyectos ferroviarios ([Figura 12](#)). Esta zonificación, implementada en la interfaz SIG, se diseñó como herramienta visual e interactiva para optimizar la selección de bancos.

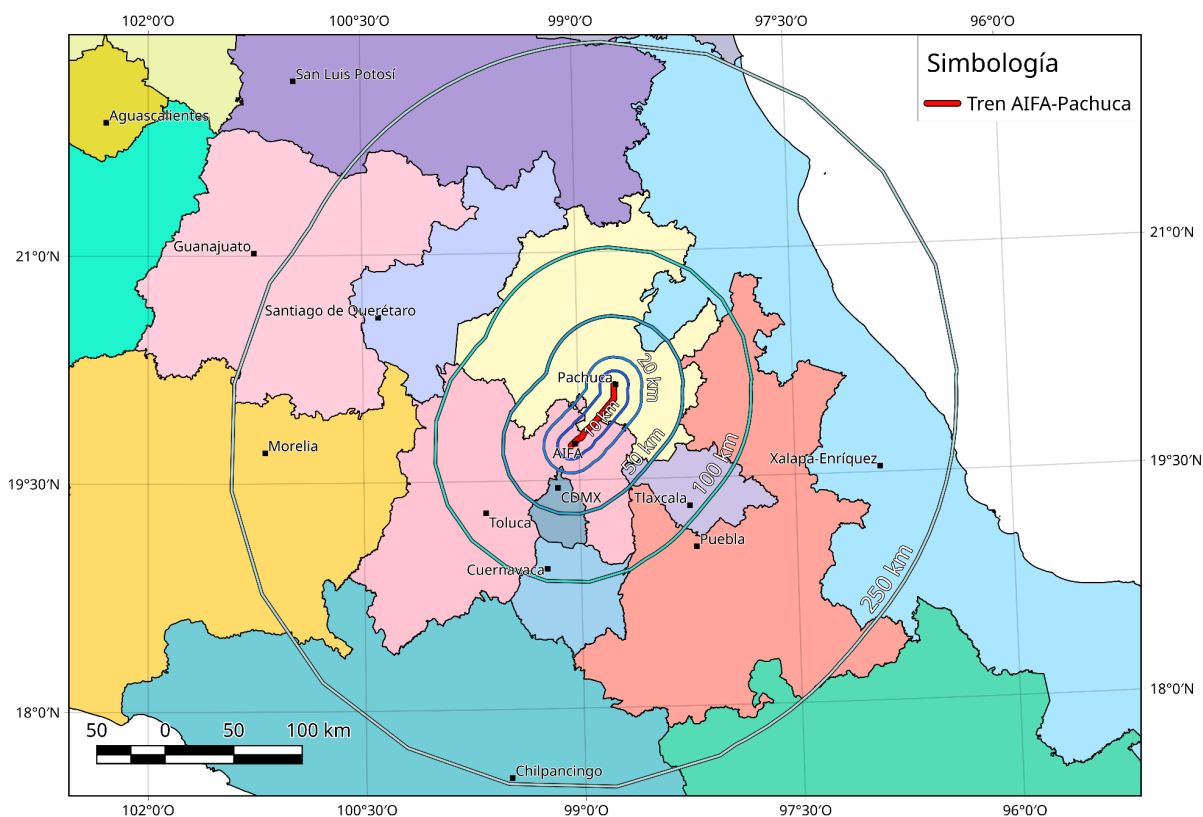


Figura 12. Regiones (“buffers”) de búsqueda para el Tren AIFA-Pachuca. Elaboración propia. Sistema de referencia: México ITRF 2008, proyección LCC (EPSG: 6372). Escala del archivo original: 1:3,250,000.

2. **Favorabilidad geológica.** Entendida como la presencia de litologías con antecedentes de explotación minera, continuidad espacial y propiedades mecánicas favorables para la producción de balasto.

A partir de estos criterios, se distinguieron **regiones con ventajas combinadas de potencial geológico y accesibilidad logística**, que concentraban bancos activos e inactivos en contextos litológicos de interés. Entre las áreas preliminarmente identificadas destacan aquellas con predominio de rocas ígneas, particularmente basaltos, andesitas y

granodioritas, reconocidas por su resistencia mecánica, baja porosidad y durabilidad frente a cargas repetitivas.

4.2.1. Cinturón Volcánico Transmexicano (CVTM).

El Cinturón Volcánico Transmexicano (CVTM) constituye un **arco magmático continental de aproximadamente 1,000 km de longitud y hasta 200 km de ancho**, asociado a la subducción de la Placa de Cocos bajo la Placa Norteamericana. Se extiende de costa a costa, desde Nayarit hasta Veracruz, atravesando los estados de Michoacán, Estado de México, Puebla, Hidalgo y Querétaro, entre otros (Gómez-Tuena et al., 2005).

Su relevancia para este estudio radica en que **abarca por completo los trazos de los proyectos ferroviarios AIFA-Pachuca y CDMX-Querétaro** (Figura 13), además de intersectar áreas de influencia de los futuros trenes Querétaro-Irapuato e Irapuato-Guadalajara.

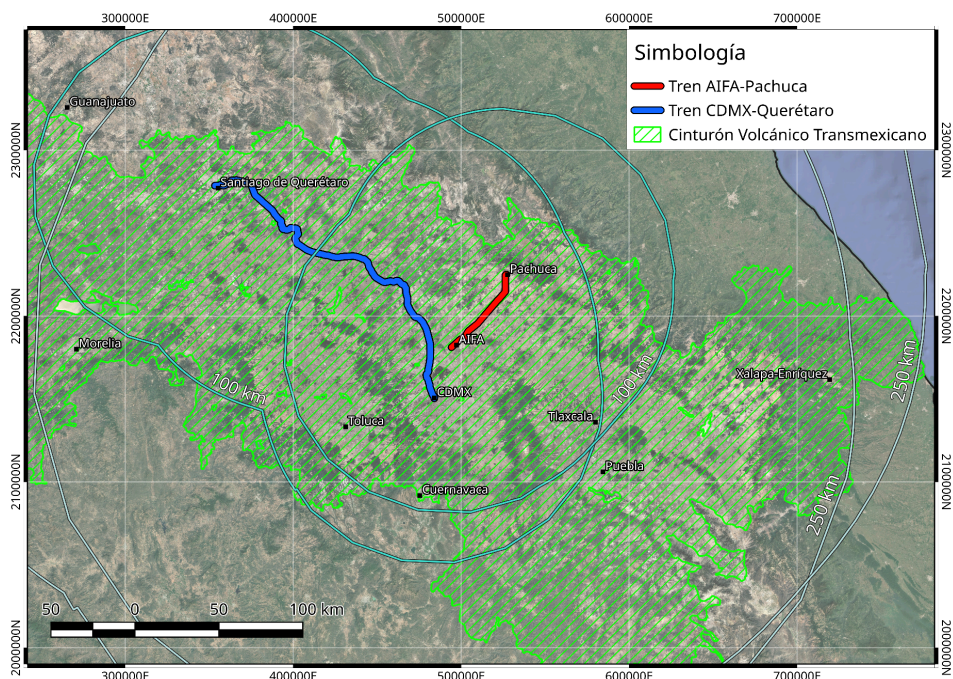


Figura 13. Extensión del CVTM alrededor de los proyectos AIFA-Pachuca y CDMX-Querétaro. Elaboración propia a partir de cartografía INEGI (2001, 2024). Sistema de referencia: UTM Zona 14N, México ITRF 2008 (EPSG: 6369). Escala del archivo original: 1:2,250,000.

Litológicamente, el CVTM se caracteriza por una **abundante presencia de rocas volcánicas máficas e intermedias**, como basaltos, andesitas basálticas y andesitas, rocas

que han demostrado en otros proyectos un **excelente desempeño como materiales para balasto** debido a su elevada densidad, baja porosidad y resistencia a la abrasión. Sin embargo, esta provincia presenta una **marcada heterogeneidad litológica**, que incluye **depósitos piroclásticos** (cenizas, tobas, ignimbritas), **lavas vesiculares** y **rocas escoriáceas**, cuyas propiedades físicas (notablemente la alta porosidad) las hacen inadecuadas para uso ferroviario.

En consecuencia, **la prospección en esta región requiere un enfoque cuidadoso para diferenciar materiales útiles de aquellos descartables**. El antecedente de múltiples bancos de basalto y andesita ya explotados en el centro del país refuerza el potencial del CVTM como proveedor estratégico de agregados pétreos, particularmente para proyectos ferroviarios de gran escala.

4.2.2. Provincia Alcalina Oriental Mexicana (PAOM).

La Provincia Alcalina Oriental Mexicana (PAOM) constituye un **cinturón magmático discontinuo que se extiende casi 2,000 km con orientación preferencial NNW-SSE, desde el estado de el norte de Coahuila hasta Veracruz** (Figura 14). Su origen ha sido vinculado tanto a la subducción de la Placa Farallón bajo Norteamérica como a procesos intraplaca posteriores (Viera-Décida et al., 2009), lo que explica su diversidad litológica.

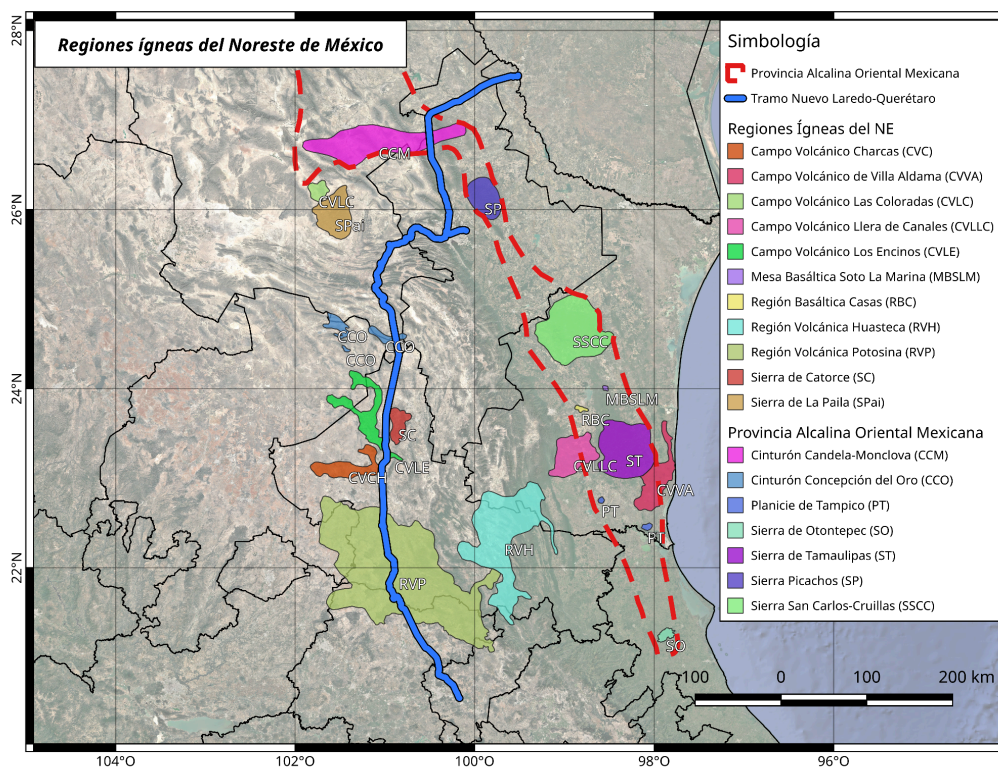


Figura 14. Regiones ígneas del noreste de México y PAOM (traza parcial), correspondencia espacial con el trazo del Tren México-Nuevo Laredo (mostrado de Querétaro a Nuevo Laredo). Elaboración propia a partir de cartografía INEGI (2024). Sistema de referencia: WGS84 (EPSG: 4326). Escala del archivo original: 1:3,500,000.

La PAOM alberga un conjunto variado de **rocas ígneas tanto intrusivas como extrusivas**. Entre las primeras destacan **granodioritas, dioritas, sienitas, monzonitas y granitos**; entre las segundas, **basaltos, fonolitas y tefritas** (Leal-Cuéllar, 2024). En general, las litologías de esta provincia **exhiben propiedades favorables como agregados para balasto**: alta densidad, baja absorción y resistencia mecánica superior.

No obstante, resulta esencial considerar la acción de **procesos detrimentales** para la calidad final de los materiales, como la **alteración hidrotermal y meteorización superficial** que tiende a modificar la mineralogía original y reducir la resistencia mecánica de las rocas. En el caso de las rocas volcánicas, la **presencia de vesículas y de texturas porfiríticas** con cristales de diferentes tamaños puede afectar negativamente el desempeño mecánico y la durabilidad del material.

Pese a estas limitaciones, la PAOM representa un **reservorio estratégico de materiales con potencial para la producción de balasto**. Su extensión, accesibilidad y antecedentes de aprovechamiento en bancos locales hacen de esta provincia una de las **zonas clave para la exploración y selección de bancos destinados a la infraestructura ferroviaria**, particularmente para el **Tren Saltillo-Nuevo Laredo**, cuyo trazo se desarrolla mayoritariamente sobre los depósitos sedimentarios que conforman la **Sierra Madre Oriental** y la **Llanura Costera del Golfo de México**. Estos materiales, por su baja resistencia y durabilidad, presentan una **escasa probabilidad de ser aprovechados como balasto**, lo que refuerza la importancia de la PAOM como fuente alterna y confiable de agregados pétreos para dicho proyecto.

4.3. Construcción de Bases de datos y SIG.

Con el objetivo de organizar y analizar la información geológica y minera relevante para la evaluación de bancos de materiales, se llevó a cabo la **georreferenciación de 45 cartas Geológico-Mineras** del Servicio Geológico Mexicano (escala 1:250,000). La información sobre bancos de agregados pétreos y rocas dimensionables contenida en dichas cartas, complementada con la distribución espacial de las unidades geológicas cercanas a los proyectos ferroviarios, constituyó la base primaria de esta investigación.

4.3.1. Digitalización y registro.

La información recopilada se integró en un **Sistema de Información Geográfica (SIG)**, con el fin de identificar y jerarquizar los bancos prioritarios para el suministro de balasto. El procedimiento metodológico incluyó las siguientes etapas:

1. **Identificación de los bancos** en las cartas Geológico-Mineras ([Figura 15](#)).

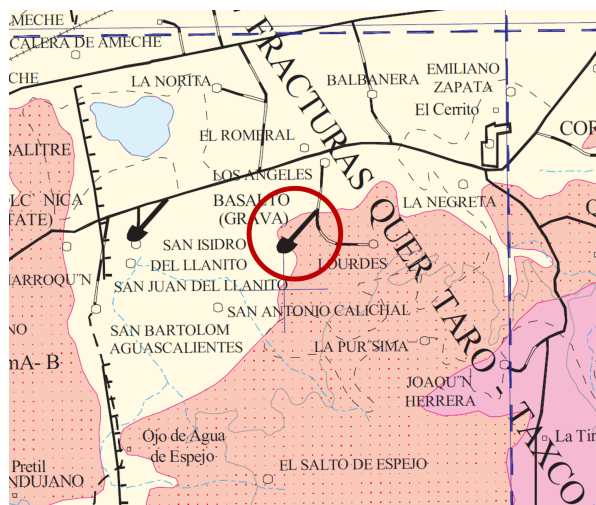


Figura 15. Identificación de banco de materiales en la cartografía GM (SGM).

2. **Digitalización** e incorporación de cada banco en una capa vectorial llamada "Bancos" ([Figura 16](#)).



Figura 16. Dato puntual digitalizado en SIG.

3. **Verificación de la localización** de cada banco mediante imágenes satelitales ([Figura 17](#)).



Figura 17. Superposición del banco digitalizado con imagen satelital. Verificación de la existencia y estado de actividad del banco.

Toda la información fue organizada en un **archivo SHP** ([Figura 18](#)) que concentra, para cada banco, los siguientes atributos ([Tabla 11](#)):

Tabla 11. Campos de la capa "Bancos".

Atributo/Campo	Descripción
Formación	Denominación formal o informal de la unidad geológica (según el LEM), en caso de poder identificarse.
Clave de unidad (SGM)	Clave indicada dentro de la carta GM de referencia. Aporta información sobre edad y litología.
Localidad	Ciudad o población cercana al banco o municipio en el que se encuentra.
Litología	Componente litológico principal del banco o de la unidad.
Litología 2	Detalles adicionales sobre la clasificación litológica y/o litologías secundarias.
Estado	Actividad del banco, según la carta Geológico-Minera consultada.
Carta GM (1:250,000)	Clave de la carta GM utilizada.
Mineralogía	Componentes mineralógicos reportados para la unidad y/o típicos de la litología predominante.

Porosidad media	Estimación cualitativa del volumen de vacíos en la roca. Procede de la investigación documental, datos de campo y pruebas de laboratorio.
Densidad relativa media	Densidad promedio de las rocas de la unidad.
Estructuras	Presencia de estructuras geológicas (fracturas, laminación, foliación) relevantes.
Distancia al trazo	Distancia lineal en kilómetros entre el banco y el trazo ferroviario de referencia.

id	Formación	Clave	Localidad	Litología	Litología2	Estado	ClaveCar	Mineralo	Porosidad	ns g/cr	Structure	Dist km
NULL	Atotonilco El...	Tpl-QCg...	Zacualoya	Conglome...	Arenisca	activo	F14-11	Qz,Kfs,Pl...	Moderada	2.50...	Conglomerados polim...	32.603
NULL	Atotonilco El...	Tpl-QCg...	Caderey...	Conglome...	Arenisca	activo	F14-11	Qz,Kfs,Pl...	Moderada	2.50...	Conglomerados polim...	33.695
NULL	Atotonilco El...	Tpl-QCg...	Caderey...	Conglome...	Arenisca	activo	F14-11	Qz,Kfs,Pl...	Moderada	2.50...	Conglomerados polim...	34.015
NULL	Atotonilco El...	Tpl-QCg...	Tula	Conglome...	Arenisca	activo	F14-11	Qz,Kfs,Pl...	Moderada	2.50...	Conglomerados polim...	39.374
NULL	Atotonilco El...	Tpl-QCg...	Caltima...	Conglome...	Arenisca	activo	F14-11	Qz,Kfs,Pl...	Moderada	2.50...	Conglomerados polim...	42.371
NULL	Andesitas La...	TplA-Da1	Acambay	Andesita	Dacita	inactivo	E14-2	Pl,Cpx,H...	Baja	2.75...	Estructuras de flujo, p...	34.683
NULL	Andesitas La...	TplA-Da1	Acambay	Andesita	Dacita	inactivo	E14-2	Pl,Cpx,H...	Baja	2.75...	Estructuras de flujo, p...	35.646
NULL	Andesita Izt...	TplQptA	San Raf...	Andesita	NULL	inactivo	E14-2	Pl,Hbl,Bt...	Baja a mo...	2.80...	Derrames lávicos, extr...	49.485
NULL	Andesita Izt...	TplQptA	Santo T...	Andesita	NULL	inactivo	E14-2	Pl,Hbl,Bt...	Baja a mo...	2.80...	Derrames lávicos, extr...	50.682
NULL	Andesita Izt...	TplQptA	Ixtapalu...	Andesita	NULL	inactivo	E14-2	Pl,Hbl,Bt...	Baja a mo...	2.80...	Derrames lávicos, extr...	52.330
NULL	Andesita El P...	TplTA-A2	Villa de ...	Toba ande...	Andesita	activo	E14-2	Pl,Hbl,A...	Baja a mo...	2.70...	Derrames de andesita...	47.617
NULL	Andesita El P...	TplTA-A2	Acozac	Toba ande...	Andesita	activo	E14-2	Pl,Hbl,A...	Baja a mo...	2.70...	Derrames de andesita...	49.232
NULL	Andesita El P...	TplA-D...	Tlanalapa	Andesita	Dacita	activo	E14-2	Pl,Hbl,A...	Baja a mo...	2.70...	Derrames de andesita...	66.275
NULL	Andesita El P...	TplTA-A2	San Ant...	Toba ande...	Andesita	activo	E14-2	Pl,Hbl,A...	Baja a mo...	2.70...	Derrames de andesita...	70.699
NULL	Andesita El P...	TplTA-A2	Calpulal...	Toba ande...	Andesita	activo	E14-2	Pl,Hbl,A...	Baja a mo...	2.70...	Derrames de andesita...	74.354
NULL	Andesita El P...	TplTA-A2	La Carid...	Toba ande...	Andesita	inactivo	E14-2	Pl,Hbl,A...	Baja a mo...	2.70...	Derrames de andesita...	81.485
NULL	Andesita El P...	TplTA-A2	Topilco ...	Toba ande...	Andesita	activo	E14-2	Pl,Hbl,A...	Baja a mo...	2.70...	Derrames de andesita...	99.705
NULL	Andesita El P...	TplTA-A2	San José...	Toba ande...	Andesita	activo	E14-2	Pl,Hbl,A...	Baja a mo...	2.70...	Derrames de andesita...	102.6...
NULL	Andesita El P...	TplA-D3	La Palma	Andesita	Dacita	activo	E14-2	Pl,Hbl,A...	Baja a mo...	2.70...	Derrames de andesita...	121.2...
NULL	Andesita Atl...	QhoA-B1	San Mig...	Andesita	Basalto	activo	E14-2	Pl,Opx,C...	Baja	2.90...	Textura hialopilitica, f...	85.739
NULL	Acapetlahua...	KiMs	Coatepe...	Arcilla	Filita/Cuar...	activo	E14-5	Qz,Ms,C...	Baja a alta	2.60...	Estratificación, folioció...	85.296

Figura 18. Tabla de atributos de la capa "Bancos" en SIG.

4.3.2. Compendio de fichas informativas por unidad geológica.

Con el fin de estimar el potencial de las diferentes unidades, se elaboró un compendio de **fichas descriptivas** que incluyen los siguientes elementos:

- Nombre y clave cartográfica de la unidad.
- Cartas Geológico-Mineras donde aparece.

- Localidades asociadas.
- Descripción litológica.
- Evaluación del potencial como fuente de balasto (resistencia, durabilidad, forma de partículas, densidad media, absorción, contenido de arcillas y partículas nocivas).

A continuación, se muestra un ejemplo de este tipo de fichas ([Figura 19](#)).

Basalto Xalapa	Clave: TplQptB	Carta: E14-3
Tipo de roca: Basalto Localidad: Múltiples (Veracruz)		
Descripción:		
La secuencia de capas basálticas y andesitas olivínicas aflorantes entre Xalapa y Cardel fue descrita originalmente por Robin C. (1975). En la porción centro-oriental del área de estudio se reconoce una gruesa sucesión de derrames lávicos basálticos ampliamente distribuida entre las ciudades de Xalapa, Coatepec y Tuzamapan, así como en las localidades de Plan del Río, Los Ídolos, Naolinco y Actopan. Esta provincia volcánica se prolonga hacia el noroeste de Xalapa, alrededor de Acajete y en las inmediaciones del sector oriental de Las Vigas de Ramírez, Veracruz. De manera aislada, sobresale un conjunto de afloramientos en la costa nororiental correspondientes a los volcanes Los Atlixcos, expuestos entre Palma Sola y Emilio Carranza. Se componen de derrames ricos en olivino, ocasionalmente intercalados con tobas y brechas que contienen bloques basálticos. En las cercanías de Plan del Río también se presentan depósitos de travertino asociados a estos eventos volcánicos. Megascópicamente, estas rocas muestran color gris oscuro, estructura compacta y textura afanítica vesicular. Bajo el microscopio presentan textura microlítica porfídica. Sus componentes principales incluyen plagioclasa cálcica (50-75%) en forma de microlitos y escasos fenocristales que constituyen la matriz, así como clinopiroxenos (5-25%) en cristales prismáticos cortos dispersos en toda la roca. Entre los componentes secundarios se identifican minerales opacos (5-25%) con hábito terroso en la matriz y óxidos de hierro (>5%) alterando los bordes de los piroxenos. La matriz está dominada por plagioclasa; el origen es ígneo extrusivo y la clasificación corresponde a basalto. Algunos basaltos alcalinos y andesitas basálticas representan los episodios más jóvenes dentro de este paquete volcánico (Robin C., 1975). De acuerdo con la compilación geocronológica de Garduño M.V.H. et al. (1992), se han reportado dos edades para rocas basálticas de 1.9 y 1.7 Ma —ubicando dichos eventos entre el final del Plioceno y el inicio del Pleistoceno— ambas al poniente de Cuauhtémoc. Asimismo, se cita una edad de 1.57 Ma para una andesita localizada al oeste de la Presa Miradores del Mar, al sureste de Xalapa. En conjunto, estas dataciones sitúan a los basaltos y andesitas de la región entre el Plioceno tardío y el Cuaternario inferior. El aprovechamiento comercial de estas rocas es amplio: múltiples bancos de materiales extraen y comercializan bloques, gravas y tezontles de distintos diámetros, empleados principalmente en el revestimiento de caminos rurales.		
Evaluación del potencial para balasto ferroviario		
Resistencia y durabilidad:		
El Basalto Xalapa presenta una alta resistencia mecánica debido a su composición mineralógica rica en plagioclasa, clinopiroxeno y olivino. Estos minerales confieren a la roca una dureza elevada y una capacidad de soporte adecuada para las cargas dinámicas generadas por el tráfico ferroviario. La durabilidad del basalto es excelente, ya que es resistente a la abrasión y a la degradación por esfuerzos repetidos. La textura compacta y la presencia de fenocristales contribuyen a su estabilidad a largo plazo.		
Forma de las partículas:		
Las partículas trituradas del basalto tienden a ser angulares a subangulares, lo que favorece el entrelazamiento mecánico entre partículas y proporciona una estabilidad estructural óptima para la vía férrea. Esta morfología también permite una distribución uniforme de las cargas dinámicas, reduciendo el riesgo de asentamientos diferenciales.		
Densidad relativa:		
La densidad promedio de 2.9 g/cm³ es alta y se encuentra dentro del rango óptimo para balasto ferroviario. Esta densidad proporciona un peso suficiente para mantener la estabilidad de la vía sin ser excesivamente pesado, además de contribuir a una mayor resistencia a la erosión y al desplazamiento por vibraciones.		
Absorción de agua:		
La porosidad baja a moderada del basalto implica una absorción de agua limitada, lo que es beneficioso para el desempeño del balasto en condiciones de humedad elevada.		
Contenido de arcillas y partículas nocivas:		
No se reporta presencia de arcillas expansivas o partículas desmenuzables en cantidades perjudiciales. Tampoco se observan partículas nocivas como materia orgánica, plásticos o materiales solubles, lo que garantiza la calidad del material para uso ferroviario.		
Resistencia a la meteorización y heladas:		
El basalto muestra una alta resistencia a la meteorización física y química, gracias a su composición mineralógica y textura densa. Es poco susceptible a la abrasión y a los efectos de la intemperie. Su baja porosidad y alta densidad lo hacen resistente a los ciclos de hielo-deshielo, lo que es crucial en regiones con climas fríos.		
Conclusión sobre el potencial para balasto:		
El Basalto Xalapa tiene un alto potencial para su uso como balasto ferroviario. Su alta resistencia, densidad y durabilidad lo hacen adecuado para soportar las cargas dinámicas del tráfico ferroviario. La ausencia de arcillas expansivas y partículas nocivas, junto con la alta resistencia a la meteorización y heladas, hacen de esta formación una opción idónea para la producción de balasto.		

Figura 19. Ficha de evaluación del potencial técnico de la unidad “Basalto Xalapa”.

4.3.3. Bancos sin unidad geológica definida.

Se identificó que cerca del **50 % de los bancos digitalizados carecen de una asignación formal o informal a una unidad geológica** (Figura 20) dentro de las cartas Geológico-Mineras consultadas. Estos bancos se localizan principalmente en **entornos volcánicos del Cinturón Volcánico Transmexicano (CVTM)** y están constituidos por **rocas relativamente jóvenes (Cenozoico, <66 Ma)**.

Por otra parte, más del **70 %** de estos bancos corresponde a **litologías ígneas extrusivas** (principalmente basaltos, andesitas y riolitas) que, por su **alta densidad, resistencia y durabilidad**, muestran **buen potencial para uso como balasto**. El resto se compone de **materiales sedimentarios** de menor competencia mecánica, generalmente **no aptos para aplicaciones ferroviarias**.

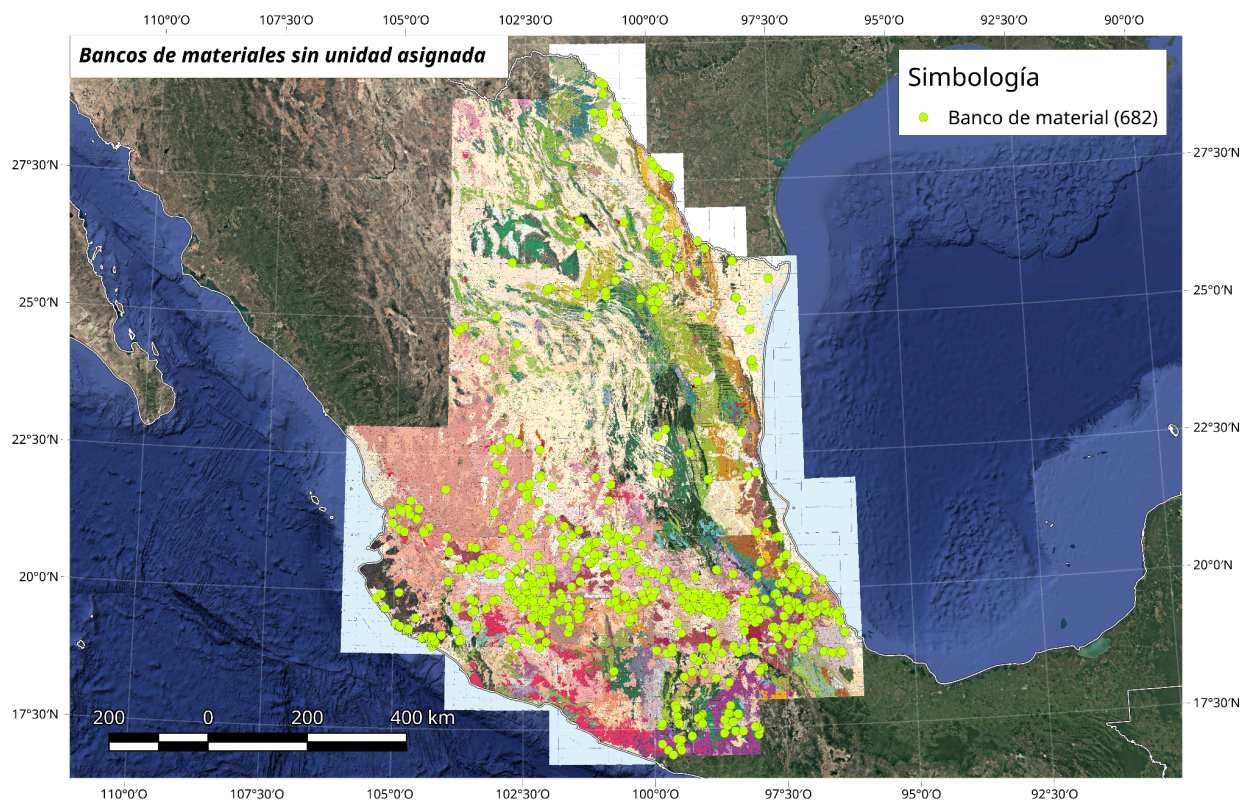


Figura 20. Mapa de bancos sin unidad geológica asignada. Elaboración propia a partir de cartografía geológico-minera del SGM . Sistema de referencia: México ITRF 2008, proyección LCC (EPSG: 6372). Escala del archivo original: 1:9,000,000.

4.4. Clasificación de bancos de materiales.

Una vez calculado el ICPB para cada banco registrado en la base de datos, se procedió a establecer una **clasificación comparativa** que permitiera priorizar las fuentes con mayor potencial de suministro. Esta clasificación se diseñó con un **enfoque flexible y ajustable**, considerando tanto los resultados numéricos del índice como las condiciones logísticas y de disponibilidad reportadas en las cartas geológico-mineras.

En términos generales, se estableció como referencia un **umbral mínimo de 80/100 puntos en el ICPB** para seleccionar bancos candidatos a cada proyecto ferroviario.

Este valor se adoptó con base en la revisión bibliográfica y en el **análisis comparativo de bancos exitosamente explotados** en proyectos previos. Sin embargo, el límite inferior puede modificarse según el contexto:

- a. **En áreas con alta densidad de bancos registrados**, el umbral puede elevarse (por ejemplo, 85 o 90 puntos) con el fin de depurar la selección y centrar los esfuerzos prospectivos en las fuentes de mayor calidad ([Figura 21](#)).

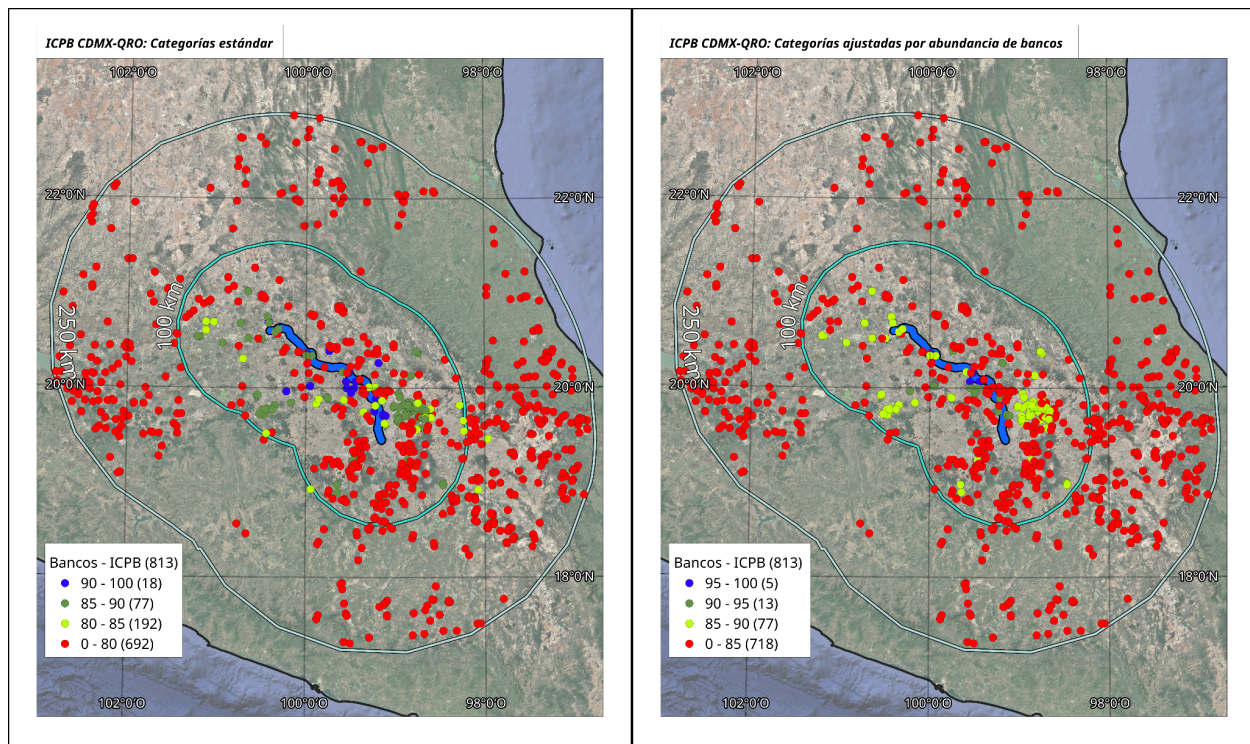


Figura 21. Mapas de distribución de ICPB, estándar y ajustado por densidad de bancos, para el Tren CDMX-QRO. Elaboración propia a partir de cartografía geológico-minera del SGM. Sistema de referencia: México ITRF 2008, proyección LCC (EPSG: 6372). Escala del archivo original: 1:5,250,000.

- b. **En zonas con menor disponibilidad de bancos**, el valor puede reducirse de manera controlada (75 o incluso 70 puntos), siempre y cuando se apliquen estudios complementarios de laboratorio que validen la viabilidad del material ([Figura 22](#)).

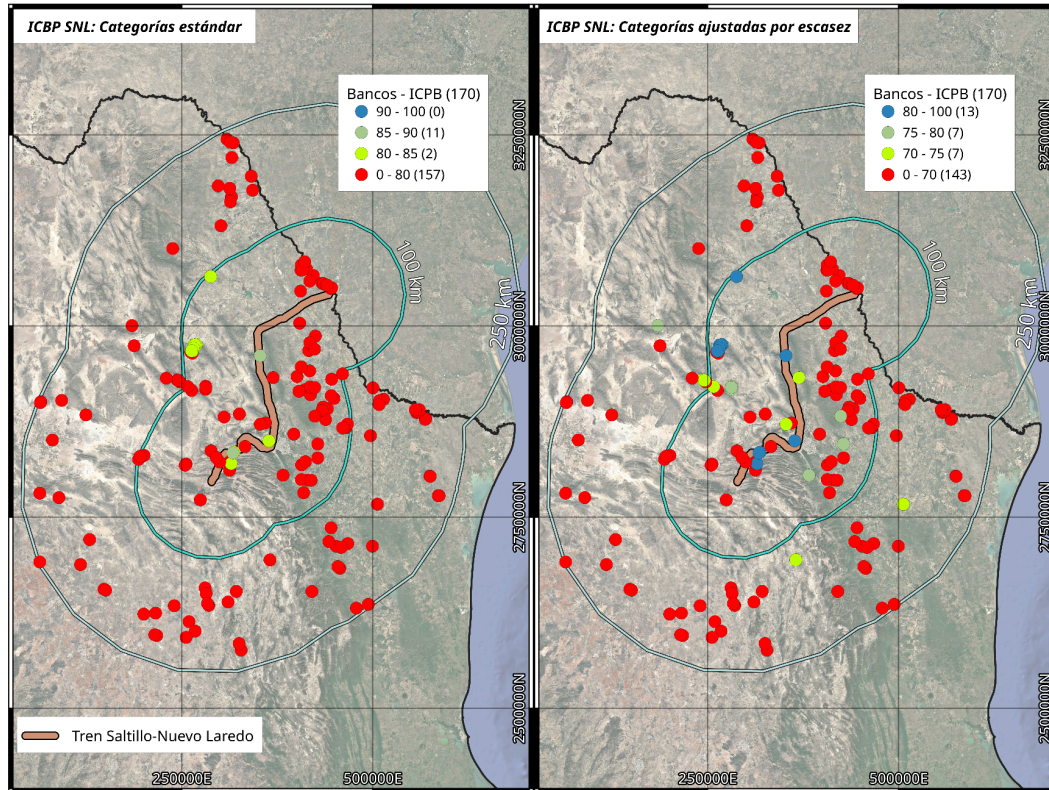


Figura 22. Mapas de distribución de ICPB, estándar y ajustado por densidad de bancos, para el Tren Saltillo-Nuevo Laredo. Elaboración propia a partir de cartografía INEGI (2024). Sistema de referencia: UTM Zona 14N, México ITRF 2008 (EPSG: 6369). Escala del archivo original: 1:5,250,000.

De este modo, la clasificación no se concibe como un criterio rígido, sino como una **herramienta adaptativa que responde a la realidad geológica, logística y económica de cada proyecto**.

Con el fin de dotar de mayor claridad a la clasificación, los bancos pueden agruparse en categorías de prioridad, por ejemplo:

- **Prioridad alta (ICPB ≥ 90):** Bancos con propiedades geológicas sobresalientes, localización favorable y antecedentes de explotación. Constituyen la primera opción de suministro.

- **Prioridad media ($85 \leq \text{ICPB} < 90$):** Bancos viables para explotación, aunque requieren verificación detallada mediante ensayos de laboratorio o estudios de accesibilidad.
- **Prioridad baja ($80 \leq \text{ICPB} < 85$):** Bancos que presentan limitaciones geológicas o logísticas, pero que podrían considerarse en escenarios de baja oferta de materiales.
- **No aptos ($\text{ICPB} < 80$):** Bancos descartados por condiciones geológicas inadecuadas o por logística desfavorable.

En síntesis, la clasificación de bancos a partir del ICPB constituye una **etapa de preselección crítica dentro de la investigación**, que reduce el universo de opciones y optimiza la asignación de recursos en los estudios posteriores de laboratorio y campo.

4.5. Cartografía temática y multipropósito.

La construcción de cartografía temática y multipropósito constituyó una etapa clave de la investigación, orientada a **transformar la información geológica y minera en herramientas visuales, operativas y de consulta** para el análisis y la toma de decisiones en proyectos ferroviarios.

I. Localización y verificación de bancos de material.

Se realizó la identificación de bancos activos e inactivos a partir del análisis de imágenes satelitales, cruzadas con la información contenida en las cartas geológico-mineras del SGM y otras fuentes de información geológica. Esta tarea permitió reconocer la distribución espacial de los bancos, su relación con el contexto geológico y su nivel de desarrollo ([Figura 23](#)).

II. Elaboración de cuadernillos técnicos de minas y bancos.

Para cada banco evaluado se diseñaron fichas técnicas estandarizadas que integran información clave:

- Imágenes satelitales y croquis de ubicación.
- Contexto geológico y litológico.
- Resultados del ICPB y parámetros petrográficos básicos.
- Distancia al trazo ferroviario y condiciones logísticas de acceso. Infraestructura asociada y nivel de desarrollo.
- Datos de contacto y antecedentes de explotación.

Estos cuadernillos constituyen una **herramienta práctica de consulta rápida**, tanto para especialistas como para tomadores de decisiones en campo ([Figura 24](#)).

III. Construcción de mapas temáticos especializados.

Se elaboraron mapas a distintas escalas, diseñados con propósitos específicos:

- **Mapas regionales**, que muestran la distribución de unidades litológicas con potencial para balasto en relación con los trazos ferroviarios ([Figura 25](#)).
- **Mapas locales**, centrados en áreas con bancos relevantes, que incluyen información geológica, topográfica y de accesibilidad ([Figura 26](#)).
- **Mapas estratégicos**, que integran variables críticas para la viabilidad de los bancos, como la ubicación de Áreas Naturales Protegidas, terrenos ejidales, zonas urbanas, carreteras, cuerpos de agua y restricciones legales o ambientales ([Figura 27](#), [Figura 28](#)).

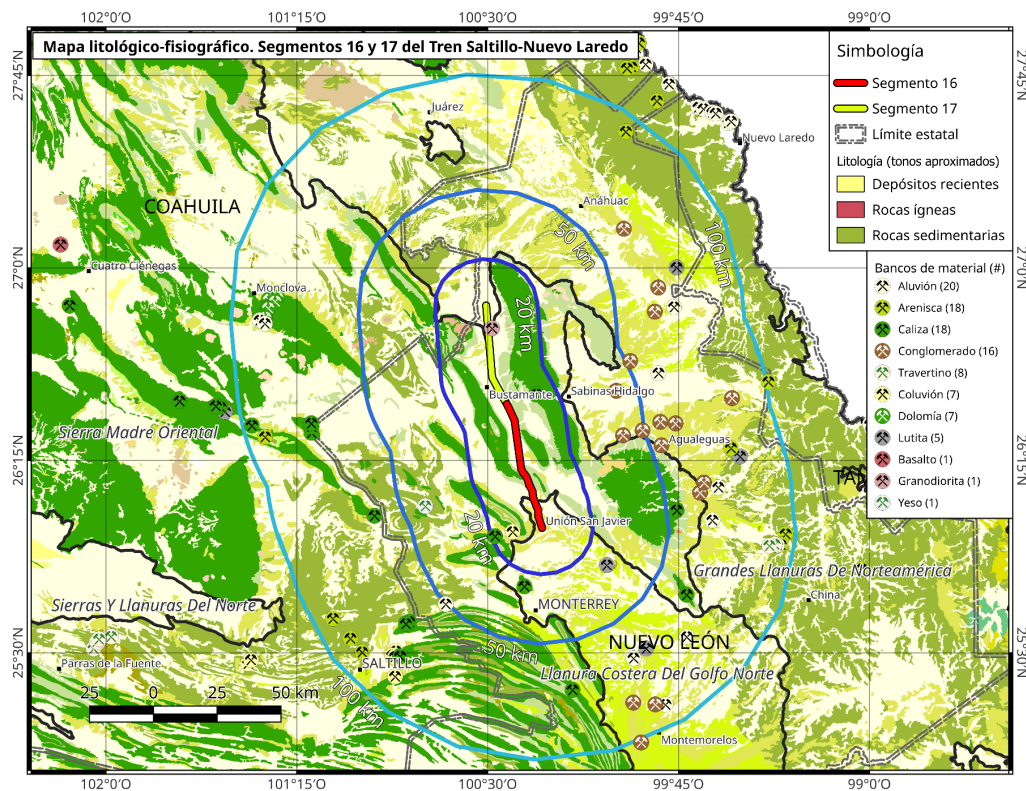


Figura 23. Mapa litológico-fisiográfico de la subregión de búsqueda (100 km) para los segmentos 16 y 17 del Tren Saltillo-Nuevo Laredo. Distribución de bancos y tipos de roca predominantes. Elaboración propia a partir de cartografía INEGI (2024). Sistema de referencia: WGS84 (EPSG: 4326). Escala del archivo original: 1:1,200,000.

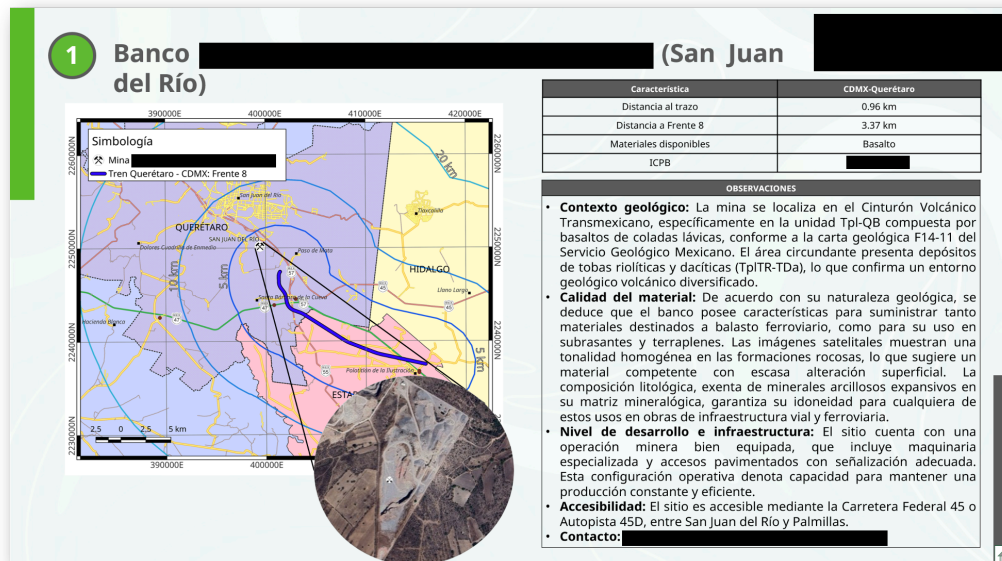


Figura 24. Cuadernillo de bancos (ejemplo). Lámina para un banco en Querétaro.

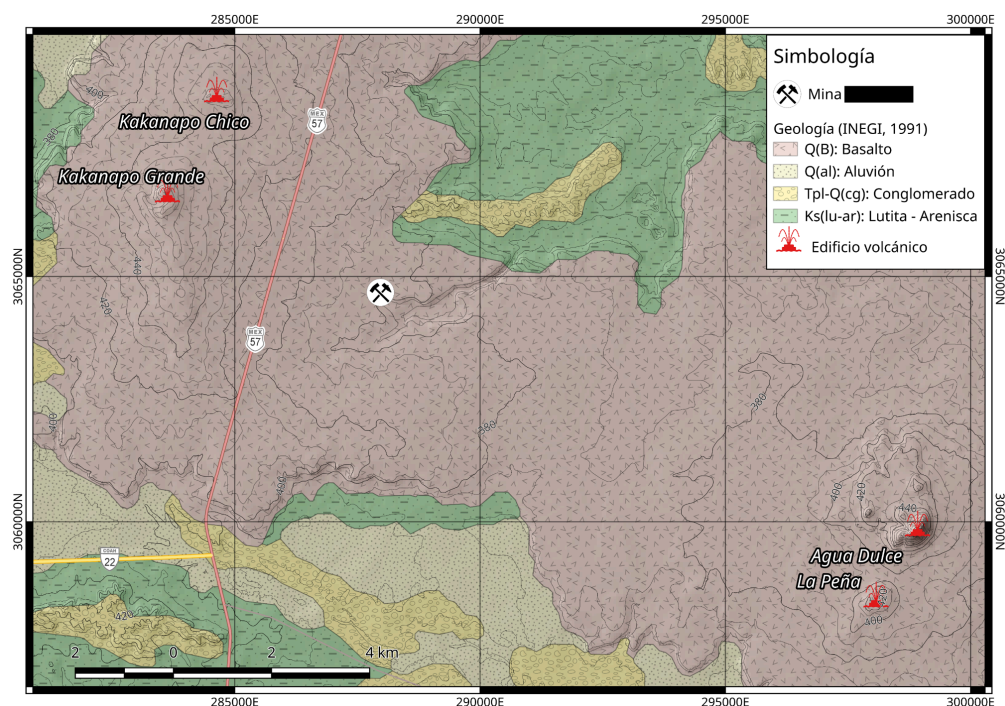


Figura 25. Mapa geológico local de un banco en Sabinas, Coahuila. Este mapa se utilizó con el fin de estimar la extensión del derrame basáltico (~100 ha) y evaluar su potencial para la producción de balasto y otros materiales pétreos. Elaboración propia basada en CETENAL (1973) y SGM (1999). Sistema de referencia: UTM Zona 14N, México ITRF 2008 (EPSG: 6369). Escala del archivo original: 1:70,000.

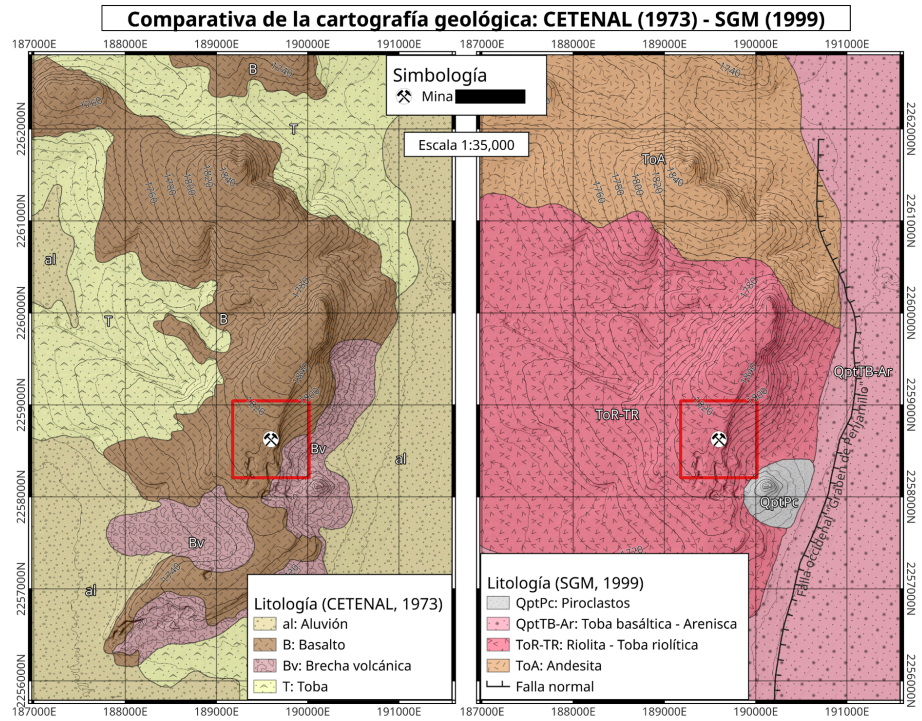


Figura 26. Comparativa entre cartografías geológicas. Se percibe una discrepancia significativa entre las rocas descritas en la región que circunda al banco (basalto y rioluta-toba riolítica). Elaboración propia basada en CETENAL (1973) y SGM (1999). Sistema de referencia: UTM Zona 14N, México ITRF 2008 (EPSG: 6369). Escala del archivo original: 1:35,000.

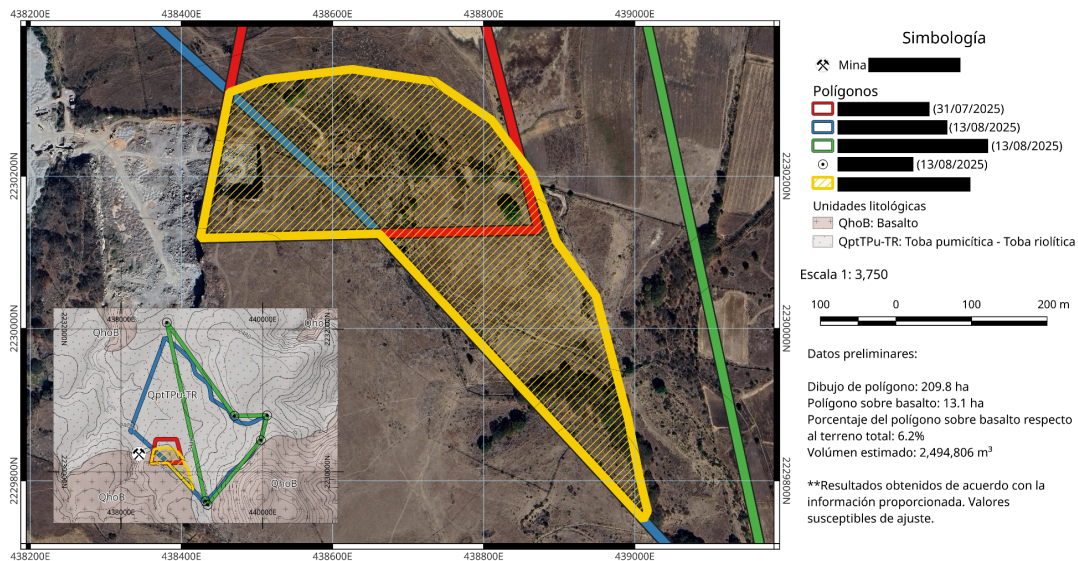


Figura 27. Mapa estratégico. Evaluación de la adquisición de un predio para la producción de agregados. Al no comprobarse la continuidad del cuerpo en la propiedad, se desechó el proyecto. Elaboración propia basada en SGM (1999). Sistema de referencia: UTM Zona 14N, México ITRF 2008 (EPSG: 6369). Escala del archivo original: 1:3,750.

Mapa prospectivo. Cinturón de Intrusivos Candela-Monclova.

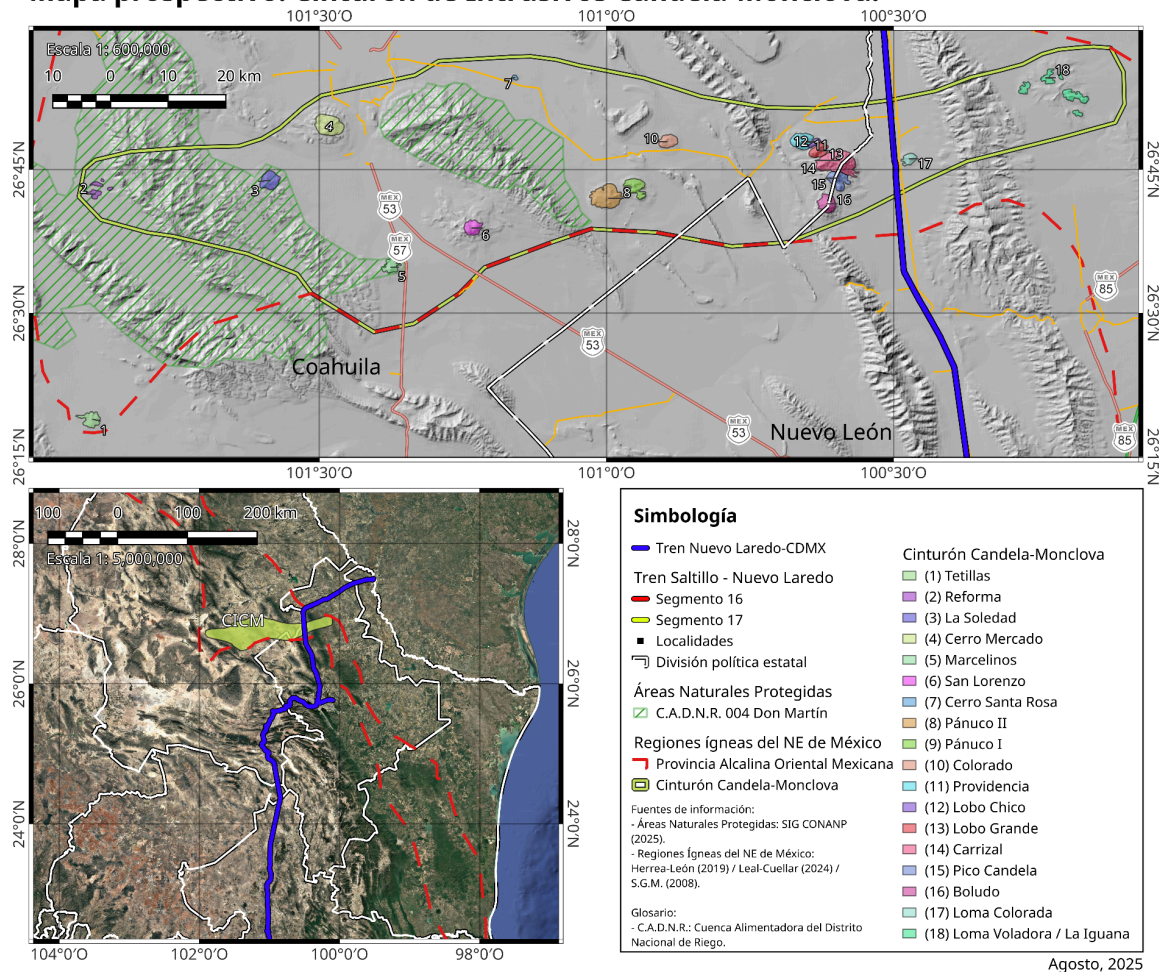


Figura 28. Mapa prospectivo (estratégico). El Cinturón de Intrusivos Candela-Monclova representa una región con alto potencial para satisfacer la demanda de materiales pétreos del Tren Saltillo-Nuevo Laredo (México-Nuevo Laredo). Elaboración propia. Arriba: Sistema de referencia: WGS84 (EPSG: 4326). Escala del archivo original: 1:600,000. Abajo: Sistema de referencia: WGS84 (EPSG: 4326). Escala del archivo original: 1:5,000,000

4.6. Planeación y ejecución de inspecciones en campo.

La evaluación de bancos de materiales no se limitó al análisis documental y cartográfico. **Se verificaron en sitio las condiciones de explotación de bancos seleccionados**, su infraestructura y calidad del producto disponible. Por ello, se planificaron y ejecutaron visitas de campo a ciertos bancos priorizados, con el fin de contrastar la información recopilada en gabinete y generar un diagnóstico operativo más realista.

4.6.1. Planificación de recorridos.

Las inspecciones se organizaron partiendo de la Ciudad de México hacia distintas regiones del país. Se diseñaron **itinerarios** que optimizaron el tiempo de traslado y la cobertura de bancos, priorizando aquellos con mayor ICPB y cercanía a los trazos ferroviarios ([Figura 29](#)). Se elaboraron **cronogramas de visita** con los siguientes objetivos:

- Verificar la infraestructura instalada.
- Evaluar la capacidad de producción y almacenamiento.
- Identificar riesgos geológicos, operativos o de contaminación del material.
- Dialogar con propietarios/operadores respecto a su viabilidad técnica, económica y jurídica.

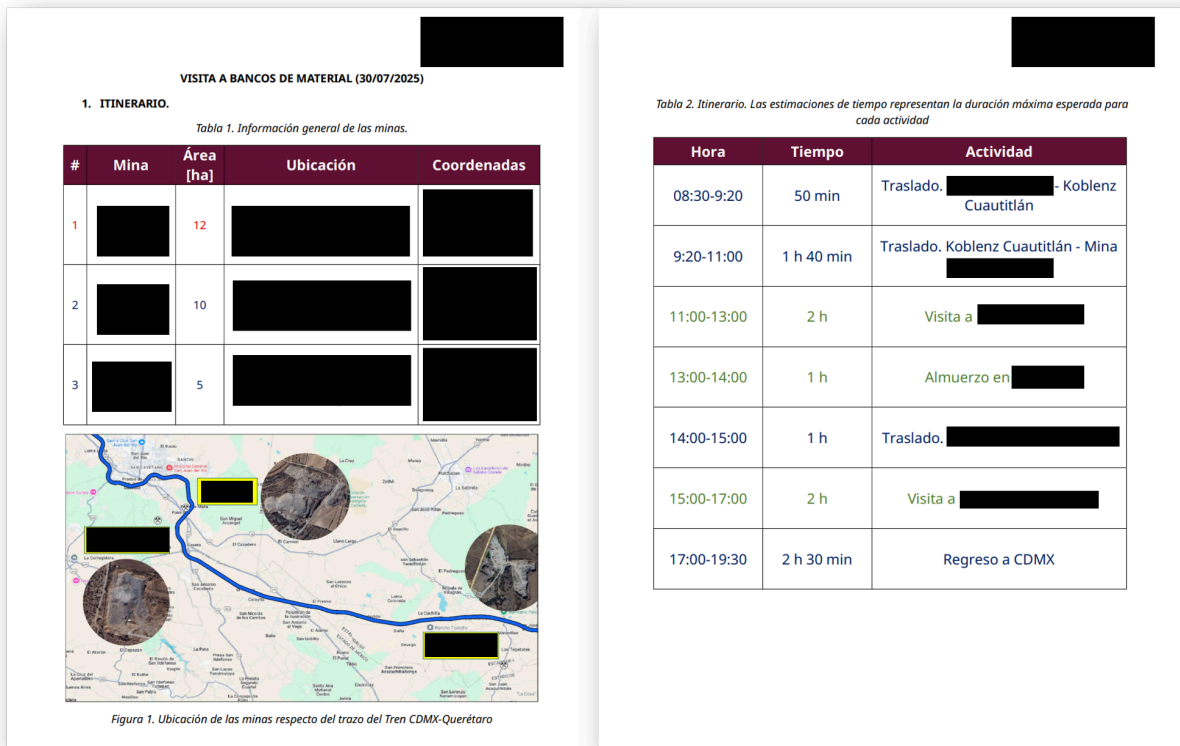


Figura 29. Ejemplo de itinerario para visita de campo.

4.6.2. Protocolo de inspección.

En cada banco se siguió un **protocolo sistemático, con actividades específicas y tiempos estimados** ([Tabla 12](#)).

Tabla 12. Descripción de las actividades de evaluación en campo.

Actividad	Detalles	Duración estimada [min]
1. Revisión del listado de información	Se determinará la información técnica de la que dispone la mina, de acuerdo con el listado de estudios sugerido. Recopilación de estudios previos, permisos y autorizaciones	20
2. Evaluación de áreas de explotación (Figura 30)	Se verificarán las dimensiones y estado de los frentes de explotación	30
	Identificación de posibles materiales contaminantes que afecten la calidad (arcillas, materia orgánica, etc.)	
3. Evaluación de áreas de trituración y clasificación	Inspección y descripción general de equipos	30
4. Evaluación de zonas de carga (acopio)	Medición general de la superficie disponible para almacenamiento de materiales	15
	Inspección del almacenamiento (contaminación cruzada, segregación de tamaños)	
5. Toma de muestras representativas	Puede realizarse: 1) En el frente de explotación (material fresco), 2) En el cono de almacenamiento o, 3) En la salida de trituración	15
6. Actividades adicionales	Toma de fotografías de zonas críticas	10

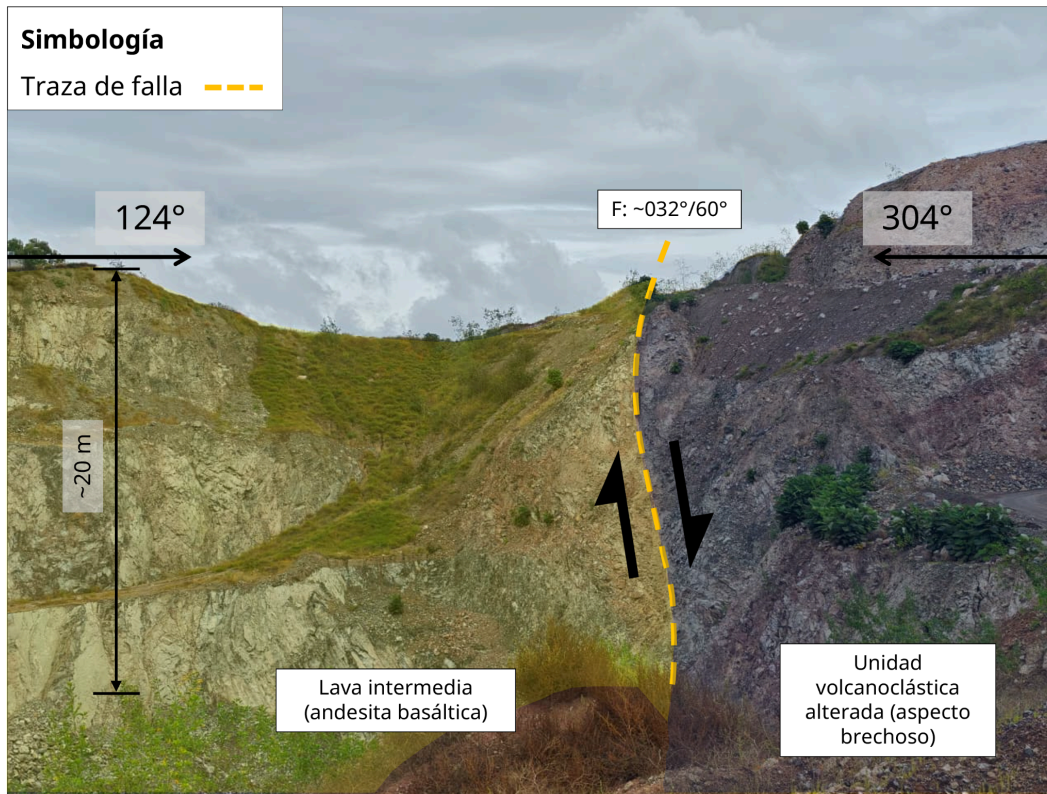


Figura 30. Vista hacia el NE de un frente de explotación en un banco de Querétaro. Se identifica una falla normal que pone en contacto una lava intermedia (andesita basáltica) en el bloque de piso con una unidad volcanoclástica alterada de aspecto brechoso en el bloque de techo. La unidad superior contiene fragmentos angulosos de lava en una matriz rojiza de baja competencia. Ambas unidades fueron consideradas no aptas para la producción de balasto ferroviario.

De forma complementaria, se realizaron **entrevistas a los propietarios y responsables técnicos**, con preguntas clave orientadas a determinar la viabilidad de cada banco. Estas se agruparon en cinco bloques:

1. **Infraestructura y maquinaria:** disponibilidad de trenes de trituración, capacidad instalada, estado de la maquinaria, suministro eléctrico y equipo de carga/acarreos.
2. **Capacidad técnica y control de calidad:** experiencia previa en producción de materiales para infraestructura, personal capacitado, disposición para realizar ensayos de laboratorio.
3. **Viabilidad económica y jurídica:** condiciones de inversión, certeza en la propiedad del terreno y permisos de explotación, disposición a firmar acuerdos formales.
4. **Logística y tiempos:** capacidad de iniciar operaciones, accesos, transporte disponible y reservas comprobadas.

5. **Relación con la comunidad y tenencia de la tierra:** régimen de propiedad, existencia de conflictos sociales o acuerdos políticos vigentes.

Estas entrevistas permitieron determinar no solo la **calidad geológica** del banco, sino también la **factibilidad de explotación inmediata**, un factor clave para proyectos ferroviarios con plazos estrictos de suministro.

4.7. Revisión técnica de estudios y reportes de clientes.

De manera paralela a las inspecciones de campo, se efectuó una revisión exhaustiva de la documentación técnica proporcionada por los propietarios y responsables de las minas o bancos de materiales. Esta información constituyó una fuente complementaria que permitió validar, contrastar o en su caso, cuestionar las observaciones realizadas en el sitio. Los documentos revisados incluyeron:

- **Informes de laboratorio:** Resultados de pruebas de desgaste (Los Ángeles), índices de plasticidad, granulometría absorción, resistencia a la compresión, entre otros ([Figura 31](#)).
- **Estudios geológicos y mineros:** Reportes de prospección, descripción de litologías predominantes, levantamientos topográficos y estimaciones de recursos y/o reservas ([Figura 32](#)).
- **Estudios de procesamiento:** propuestas de trituración y cribado, esquemas de flujo de producción, capacidades de planta ([Figura 33](#)).
- **Reportes de producción y calidad histórica:** documentos que evidencian la entrega previa de agregados a proyectos de infraestructura (carreteras, obras hidráulicas, ferroviarias).

La revisión de estos insumos permitió corroborar la **validez y actualidad de la información** frente a normas nacionales e internacionales (NOM-003-ARTF-2023, Lineamientos ARTF, AREMA).

Fue posible, además, **comparar los resultados de laboratorio con la normativa y con el estado de los materiales *in situ***. En consecuencia, pudieron detectarse inconsistencias o vacíos de información.

Finalmente, se consiguió evaluar la confiabilidad de los bancos en función de la **calidad y trazabilidad** de sus reportes.

REPORTE BALASTO					
ENSAYO Y CONTROL DE CALIDAD BALASTO					
BALASTO TIPO BALASTO			DE INFORME: ENERO 2023		
NATURALEZA: Roca (EXTRINSECO BALASTO) (símbolo B)			SOLICITANTE: A QUEEN CORRESPONDA		
FORMA: TON			PESO MUESTRA (kg): 50.00		
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO					
TAMICES		% DE LA MASA QUE PASA POR LOS TAMICES (EN PESO)			CUMPLE
		CUMPLE	TOLERANCIA	ENSAYO	IT- TOLERANCIA
75.0		3%	100	97-100	99
85.0		2 1/2%	90-100	87-100	90
88.0		2%	0	0	0
95.0		1 1/2%	20-40	20-43	40
105.0		1%	0	0	0
117.5		3/4%	0-10	0-13	7
125.0		1/2%	0-5	0-6	6
RETENIDO ENTRE 0.075 Y 2.0		100	140	140	140

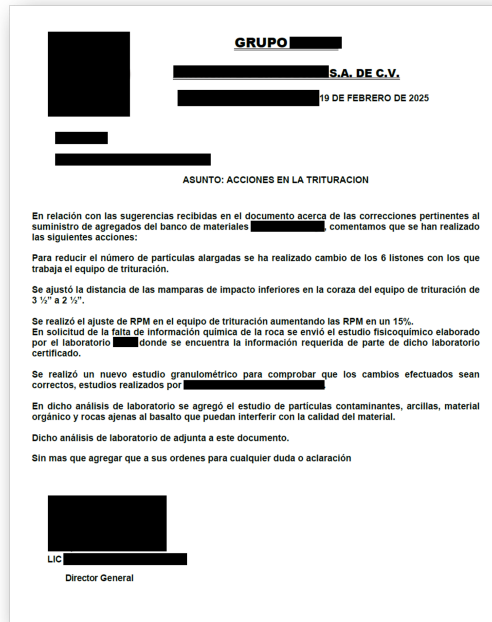


Figura 33. Ejemplo de comunicación con socios mineros. Se realizó una colaboración para evaluar los productos de la mina y se detectaron problemas en la granulometría de los agregados.

4.8. Evaluación logística y análisis de riesgos de suministro.

Además de los aspectos técnicos y de calidad del material, se realizó una valoración preliminar de los **factores logísticos y de riesgo** asociados al suministro de balasto y agregados pétreos. El objetivo de esta evaluación fue **identificar de manera temprana las condiciones que podrían favorecer o limitar la explotación de un banco**, así como prever escenarios que comprometan la continuidad en el suministro a los proyectos ferroviarios. Entre los factores considerados destacan:

- **Accesibilidad y conectividad:** Condiciones de los caminos de acceso (pavimentados o de terracería), distancia a carreteras primarias y proximidad a nodos ferroviarios.
- **Disponibilidad de infraestructura:** Existencia de plantas de trituración y cribado, talleres de mantenimiento, patios de acopio y básculas de pesaje.
- **Seguridad jurídica:** Situación legal de la concesión minera o permisos de extracción, así como claridad en la propiedad o tenencia de la tierra (privada, comunal o ejidal).

- **Riesgos ambientales y sociales:** Ubicación en Áreas Naturales Protegidas, cercanía a centros de población o posibles conflictos sociales con comunidades aledañas.
- **Capacidad de producción y reservas:** Estimaciones preliminares de volumen explotable frente a la demanda de los proyectos.
- **Factores de seguridad y continuidad operativa:** Riesgos asociados a la estabilidad de los frentes de explotación, vulnerabilidad ante fenómenos climáticos extremos (inundaciones, deslaves), o situaciones de inseguridad en la región.

La sistematización de estos aspectos permitió elaborar un **perfil de riesgo logístico por banco**, el cual se utilizó como complemento al puntaje ICPB y a la evaluación técnica. Con ello fue posible priorizar no solo la **calidad del material**, sino también la **confiabilidad y sostenibilidad de su suministro**.

5. Resultados del análisis preliminar.

5.1. Panorama general de los bancos y localidades evaluadas.

La prospección integral permitió reunir información de **1,199 bancos y minas** (activos e inactivos) con potencial para la producción de agregados pétreos, distribuidos en un área de aproximadamente **1,033,051 km²** y abarcando **45 cartas Geológico-Mineras** publicadas por el **Servicio Geológico Mexicano (SGM)** ([Figura 34](#)).

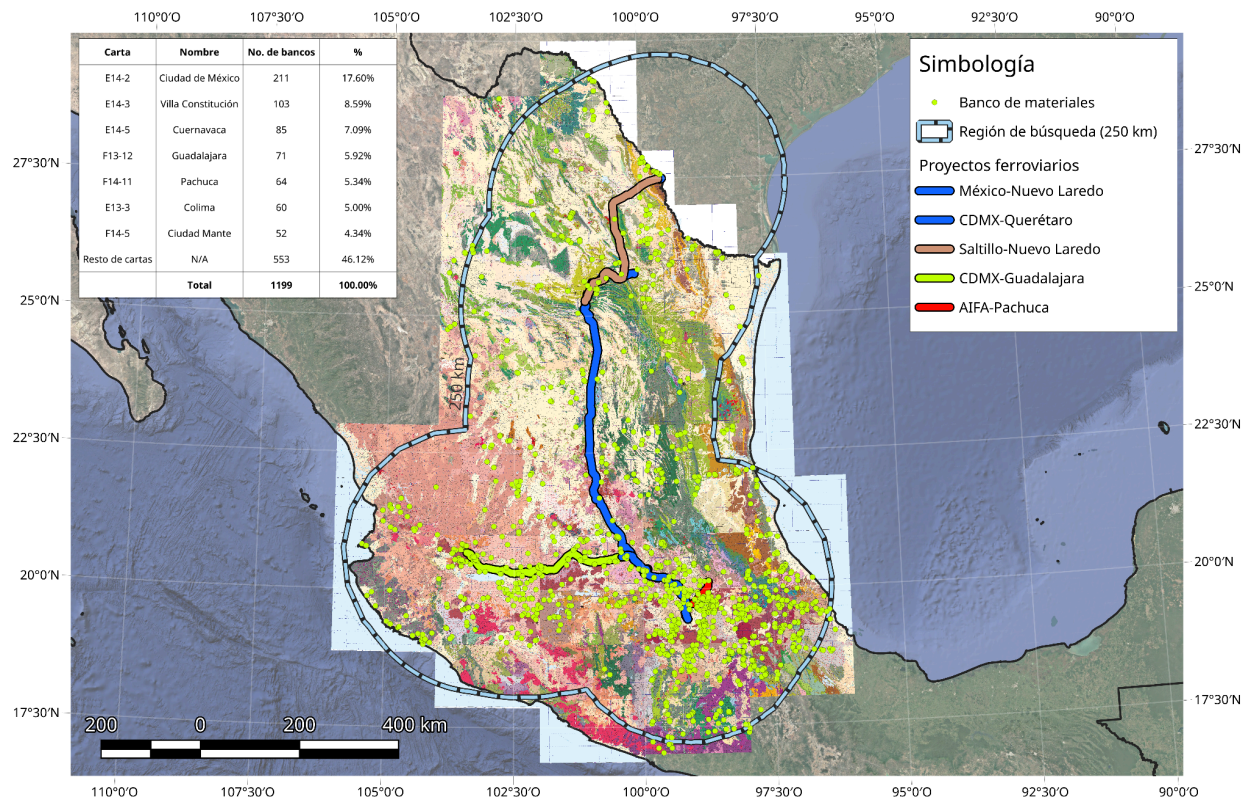


Figura 34. Mapa general de bancos identificados y su relación espacial con los proyectos ferroviarios México-Nuevo Laredo, CDMX-Querétaro, Saltillo-Nuevo Laredo, CDMX-Guadalajara y AIFA-Pachuca. Elaboración propia a partir de cartografía geológico-minera del SGM. Sistema de referencia: México ITRF 2008, proyección LCC (EPSG: 6372). Escala del archivo original: 1:9,000,000.

Este compilado constituye una de las bases de datos más extensas generadas para el análisis de materiales destinados a infraestructura ferroviaria en México, al incorporar tanto los registros del SGM como **bancos adicionales identificados mediante análisis satelital y reportes de socios y colaboradores** que no figuran en la cartografía oficial.

La [Tabla 13](#) muestra la distribución de los bancos por provincia fisiográfica. El **Cinturón Volcánico Transmexicano (CVTM)** concentra **más de la mitad del total (56 %)**, reflejando su relevancia como principal reservorio de rocas ígneas (particularmente basaltos, andesitas y riolitas), mientras que el resto se reparte entre la **Sierra Madre Oriental (14 %)**, la **Sierra Madre del Sur (10 %)** y la **Llanura Costera del Golfo Norte (8 %)**. Provincias como la **Mesa del Centro (4 %)** y las **Grandes Llanuras de Norteamérica (5 %)** presentan también núcleos significativos de actividad extractiva.

Tabla 13. Distribución de bancos por provincia fisiográfica (dentro del área de estudio).

Provincia fisiográfica	Cantidad de bancos	%
Cinturón Volcánico Transmexicano	667	55.6
Sierra Madre Oriental	164	13.7
Sierra Madre Del Sur	121	10.1
Llanura Costera Del Golfo Norte	90	7.5
Grandes Llanuras De Norteamérica	64	5.3
Mesa Del Centro	48	4.0
Sierra Madre Occidental	25	2.1
Llanura Costera Del Golfo Sur	11	0.9
Sierras Y Llanuras Del Norte	3	0.3
Resto de provincias	6	0.5

En conjunto, las **provincias ígneas del centro y oriente del país** reúnen más del **70 % de los bancos registrados**, lo que confirma su papel estratégico en la provisión de agregados de alta resistencia y baja porosidad, ideales para balasto y subbalasto.

Por contraste, las provincias **sedimentarias del norte y noreste**, aunque geográficamente extensas, muestran una menor densidad de bancos con potencial ferroviario, dado el predominio de calizas, lutitas y areniscas de baja competencia mecánica.

A nivel litológico, se reconocen **cerca de 40 tipos de rocas distintas**, con predominio de **ígneas extrusivas (70 %)**, seguidas de **metamórficas (15 %)** y **sedimentarias (15 %)**. Esta diversidad refleja la complejidad geológica del territorio mexicano y la necesidad de criterios diferenciados para cada entorno.

En cuanto a la **calidad potencial de los materiales**, el análisis mediante el **Índice de Calidad Potencial de Balasto (ICPB)** evidenció que **121 bancos (14.9 %)** superaron los **80 puntos sobre 100** para el **proyecto CDMX-Querétaro**, mientras que **100 bancos (14.8 %)** alcanzaron ese valor para el **proyecto AIFA-Pachuca**, lo que subraya la **escasez relativa de fuentes con calidad superior** dentro del área de estudio ([Figura 35](#)).

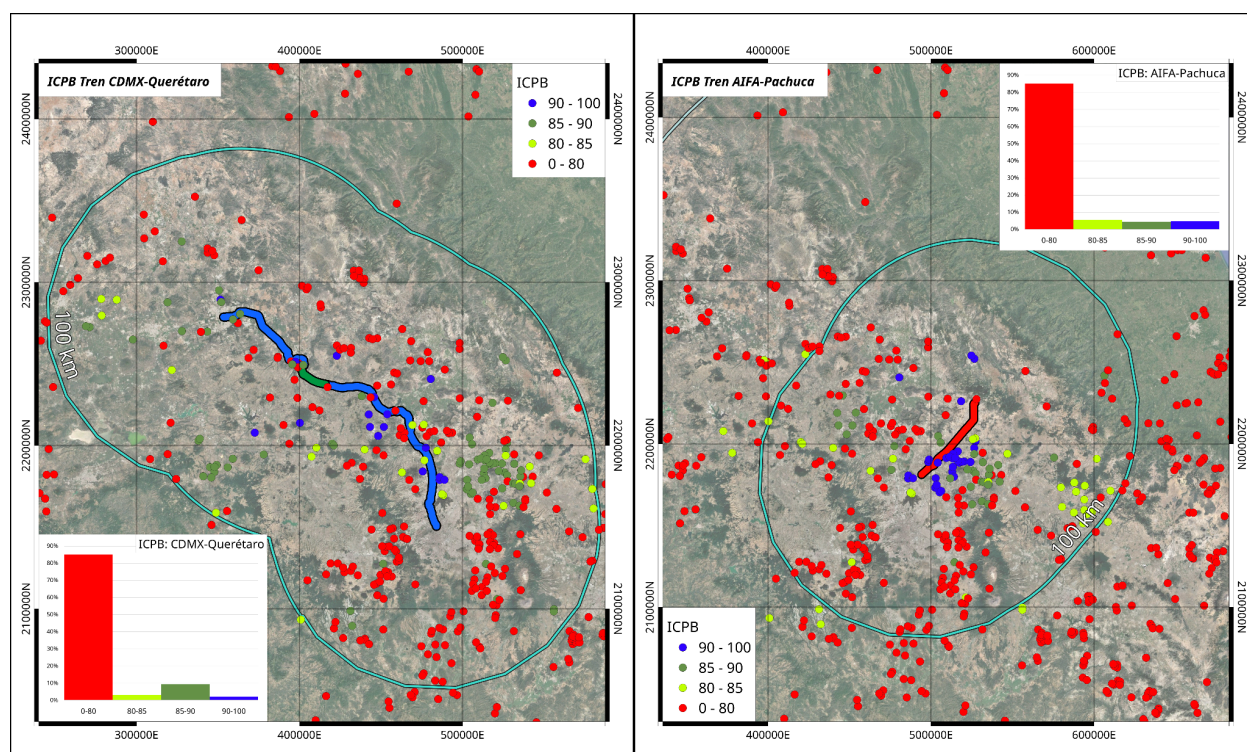


Figura 35. Mapa de distribución del ICPB para los trenes CDMX-Querétaro y AIFA-Pachuca. Elaboración propia. Sistema de referencia: México ITRF 2008, proyección LCC (EPSG: 6372). Escala del archivo original: 1:2,750,000.

Asimismo, se detectó que apenas **13 bancos (7.6 %)** superaron los **80 puntos sobre 100** para el proyecto **Saltillo-Nuevo Laredo**. Esta observación es consistente con la hipótesis

de mayor escasez de bancos con calidad para producir balasto en el noreste del territorio mexicano. Para conseguir una mejor visualización durante la selección de bancos candidatos en este proyecto se optó por realizar una **ajuste en las categorías de prioridad del ICPB** (Figura 36).

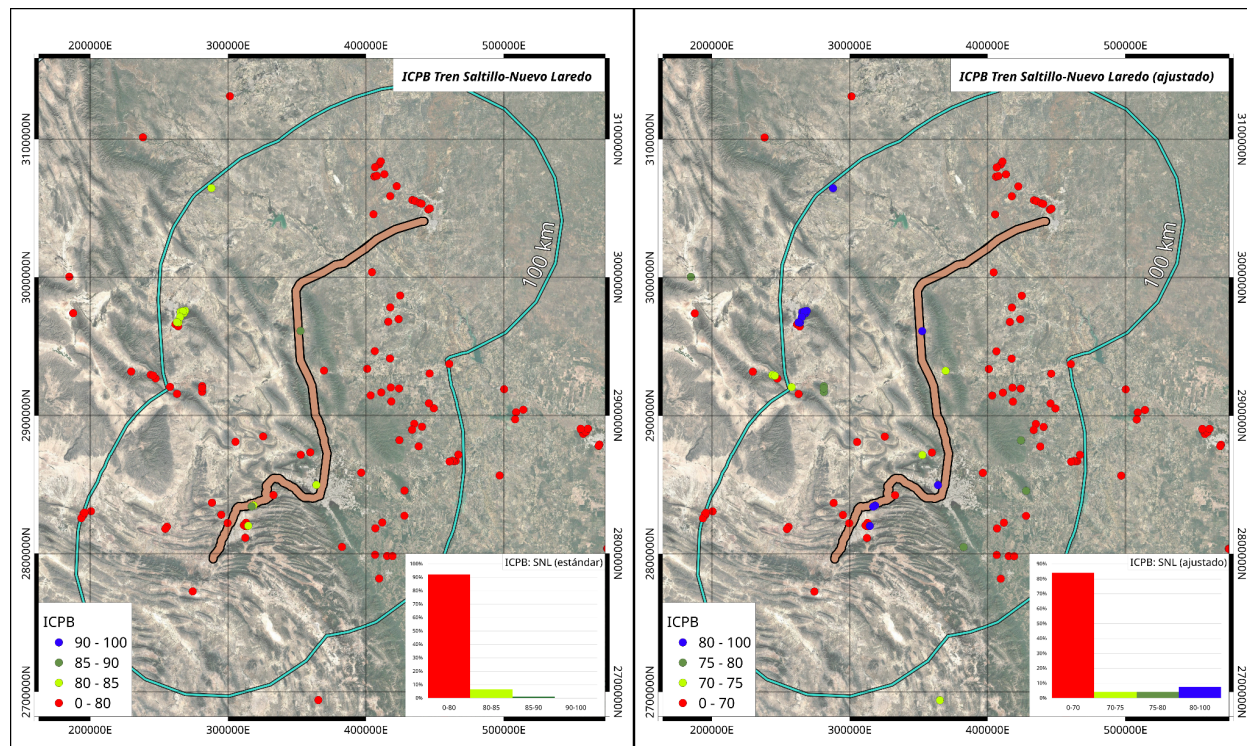


Figura 36. Mapa de distribución del ICPB para el Tren Saltillo-New Laredo. Categorías de prioridad estándar y ajustada por densidad de bancos. Elaboración propia. Sistema de referencia: México ITRF 2008, proyección LCC (EPSG: 6372). Escala del archivo original: 1:3,250,000.

Estos resultados resaltan la **amplitud geográfica y diversidad litológica** de la base de datos, así como la **dificultad inherente de garantizar el suministro de materiales de calidad ferroviaria** dentro de los radios logísticos establecidos.

5.2. Evaluaciones técnicas representativas.

Como parte del proceso de validación de los resultados obtenidos mediante el Índice de Calidad Potencial de Balasto (ICPB), se seleccionaron casos representativos que ilustran la aplicación práctica del método y su correlación con observaciones de campo. Uno de ellos corresponde al **Banco A**, evaluado como posible proveedor de materiales pétreos para el proyecto ferroviario CDMX-Querétaro.

De acuerdo con la base de datos generada, el Banco A obtuvo una puntuación ICPB de **74.52/100**, ubicándose en la categoría de **“No apto”** para el suministro de balasto. El sitio se encontraba **inactivo al momento de la evaluación**, aunque sus **propietarios manifestaron interés en reactivar la explotación** y para ello solicitaron un análisis de la viabilidad técnica del material en la producción de balasto, subbalasto y capas de asiento.

Si bien el personal del banco reportó la **presencia de basalto**, la cartografía disponible es ambigua al respecto. La cartografía geológica del INEGI (Carta F14-10) respalda las observaciones del personal del banco, mientras que la cartografía geológico-minera del SGM (Carta F14-10 “Querétaro”) identifica la unidad local como predominantemente constituida por **tobas riolíticas y dacíticas**. Esta **discrepancia**, aunada a posibles ventajas logísticas y comerciales del banco, motivó una inspección directa. La visita de campo permitió confirmar que **las rocas presentes corresponden efectivamente a lavas de composición intermedia-básica**, no a depósitos piroclásticos.

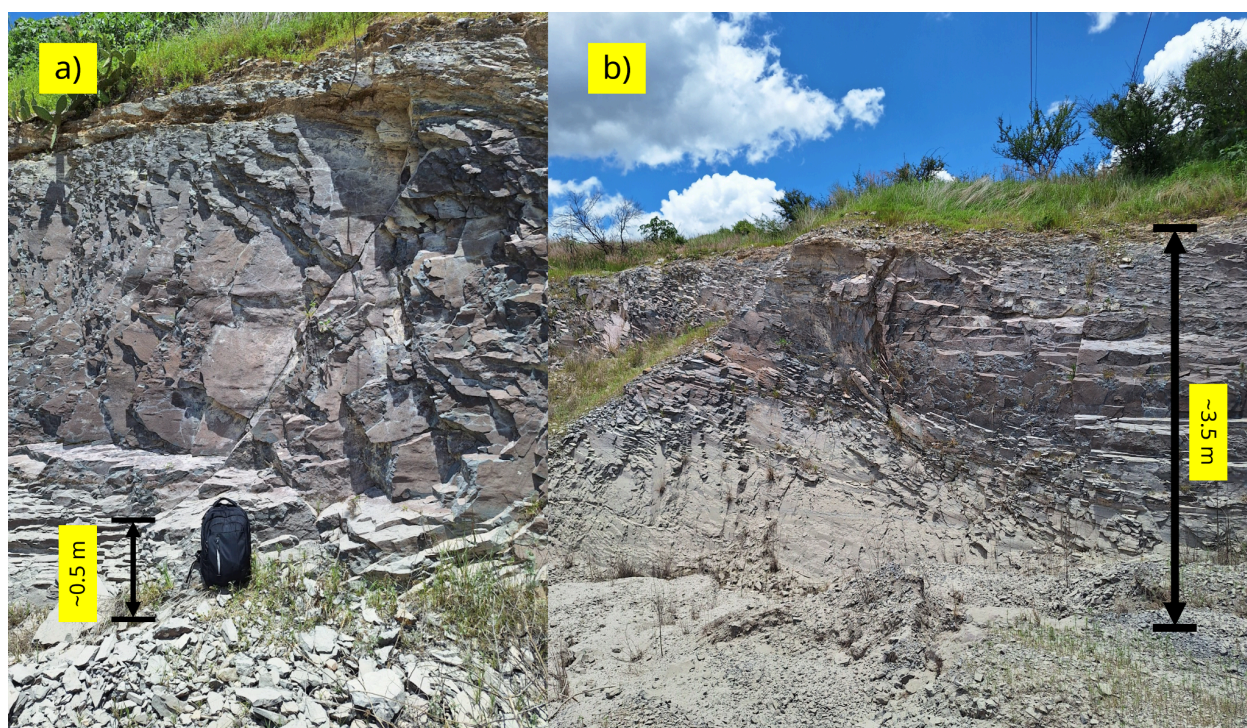


Figura 37. Frentes de explotación en el Banco A.

El corte principal del Banco A ([Figura 37.a](#)) expone **rocas de color gris-pardo**, con **textura fina a muy fina**, dispuestas en un **arreglo lajeado subparalelo**, con espaciado centimétrico a decimétrico y curvaturas suaves. En la base se distinguen planos arqueados y divergentes, mientras que los niveles superiores presentan bandas más rectilíneas,

definidas por fracturamiento planar y subplanar que delimita bloques tabulares de hasta varios decímetros de espesor ([Figura 37.b](#)).

La roca muestra una **transición vertical** desde zonas más **masivas en la base** hacia **niveles más fracturados y oscuros en la parte superior**. No se observan estructuras sedimentarias ni clastos exógenos, lo que confirma su origen ígneo extrusivo.

Estas características permiten interpretar que el afloramiento corresponde a un **flujo de lava intermedia-máfica** que desarrolló una **estructura lajeada** por enfriamiento rápido y por la **dinámica interna del flujo** durante su avance.

Durante el emplazamiento, la lava formó una **corteza superficial rígida** que, al ser deformada por **esfuerzos de cizalla y flexión** derivados del movimiento del flujo, se fragmentó en **placas tabulares**. La contracción térmica progresiva consolidó este patrón, produciendo lajas delgadas, angulosas y subparalelas. La inclinación casi uniforme de dichos planos sugiere que **la dirección del desplazamiento del flujo controló la orientación de las fracturas**.

En consecuencia, aunque la composición mineralógica y la densidad de la roca son favorables para la producción de materiales pétreos, **la estructura lajeada representa una limitante crítica** para su uso como balasto, ya que dificulta obtener agregados con una **granulometría cúbica y estable** dentro del rango especificado por la **NOM-003-ARTF-2023** (Balasto No. 24: 1/2"–3"). En consecuencia, el material **no cumple con los criterios de forma y resistencia** requeridos para el balasto ferroviario.

Por otra parte, se determinó que el banco **podría ser viable para subbalasto**, donde se permite un tamaño máximo de partícula menor (~2") y donde los cortes masivos de la roca, de fractura más gruesa, permitirían producir un material adecuado tras un proceso de trituración controlada.

Finalmente, se concluye que la **mejor oportunidad de aprovechamiento** para el Banco A radica en la **producción de materiales para capas de subrasante y terraplén**, siempre que se realicen ensayos complementarios que confirmen su durabilidad y comportamiento mecánico bajo carga.

Esta visita proporcionó un **ejemplo consistente** con los resultados del **ICPB**: un banco clasificado como **"No apto"** mostró en campo una baja probabilidad de producir balasto de calidad, lo que refuerza la **utilidad práctica del índice como herramienta de evaluación preliminar**. La validación integral de la metodología requiere aún un mayor número de casos de estudio y análisis comparativos adicionales.

5.3. Propuestas de bancos para el suministro.

Se identificaron bancos con alto potencial conforme a la metodología descrita en el capítulo 4. Estos sitios fueron evaluados con un ICPB ≥ 80 y muestran condiciones logísticas, operativas y ambientales favorables. Por razones de confidencialidad no se mencionan de forma explícita, pero su selección deriva de la integración de criterios geológicos, petrográficos y de accesibilidad establecidos en la evaluación.

5.4. Diagnóstico general de la disponibilidad y calidad de materiales.

El análisis integrado de la base de datos geológica, los resultados del ICPB y la distribución espacial de los bancos permite elaborar un diagnóstico amplio sobre la disponibilidad y calidad de los materiales dentro de la región de estudio.

En primer término, la **oferta geológica es amplia y diversa**, con presencia de alrededor de **1,199 bancos** distribuidos en **45 cartas geológico-mineras**, abarcando una superficie próxima a **1,033,051 km²**. Esta amplitud cubre prácticamente todas las provincias fisiográficas involucradas en los tres proyectos: CVTM, Sierra Madre Oriental, Mesa del Centro y Llanuras Costeras. La [Figura 38](#) confirma un predominio claro de **rocas volcánicas en el centro del país** (basaltos, andesitas y riolitas), así como de **rocas sedimentarias en el noreste** (calizas y dolomías), patrón coherente con la configuración geológica regional.

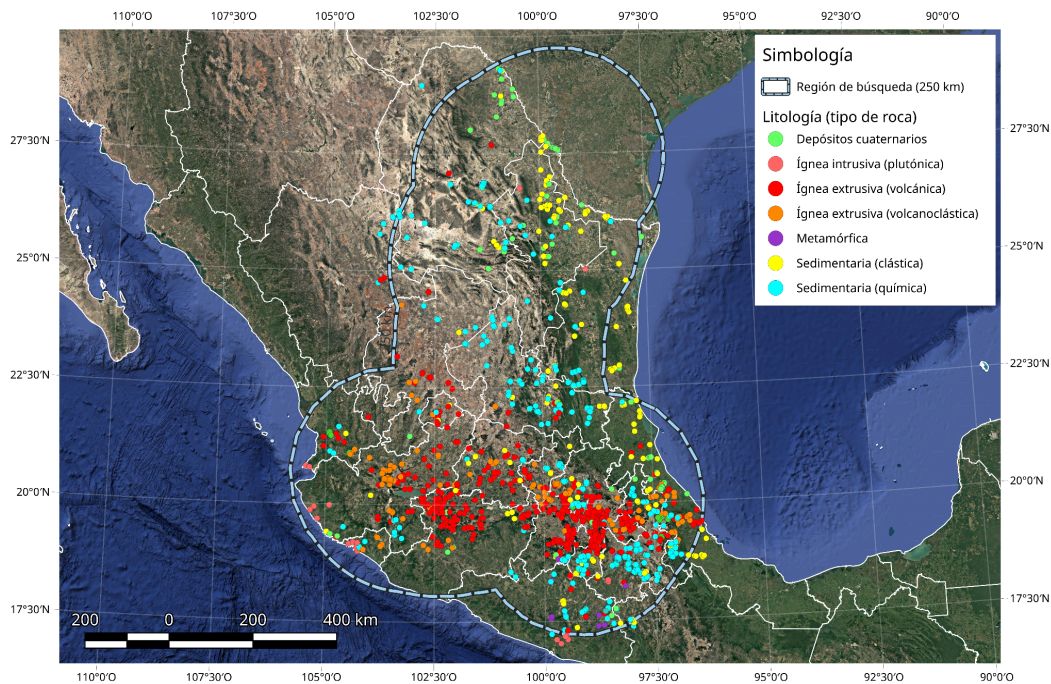


Figura 38. Mapa general de bancos por tipo roca dentro de la región de búsqueda. Elaboración propia. Sistema de referencia: México ITRF 2008, proyección LCC (EPSG: 6372). Escala del archivo original: 1:9,000,000.

En términos de calidad, los proyectos AIFA-Pachuca y CDMX-Querétaro presentan un comportamiento similar, con promedios del ICPB de **62.06±16.16** y **62.63±16.58**, respectivamente. Ambos valores son consistentes con la abundancia de rocas volcánicas competentes dentro de las regiones asociadas. En contraste, el proyecto **Saltillo-Nuevo Laredo** muestra un promedio menor (**55.95±13.77**), lo cual refleja la dominancia de litologías sedimentarias, cuyo desempeño mecánico suele presentar mayor variabilidad y menor resistencia a la degradación.

Tabla 14. Panorama general ICPB.

Proyecto ferroviario	No. Bancos	Superficie analizada [km ²]	Densidad de bancos (por cada 1,000 km ²)	ICPB/100 ($\bar{x} \pm \sigma$)	No. Bancos ICPB≥80
AIFA-Pachuca	675	222,270.60	3.04	62.061±16.156	100 (14.81 %)
CDMX-Querétaro	813	297,417.69	2.73	62.632±16.579	121 (14.88 %)
Saltillo-Nuevo Laredo	170	356,549.49	0.48	55.951±13.775	13 (7.6 %)

Este comportamiento también se observa en la **densidad de bancos**. Mientras que el CVTM concentra más de la mitad de los sitios registrados (56 % del total), las provincias del noreste presentan densidades notablemente menores. La consecuencia práctica es clara: **el potencial técnico es elevado en el centro del país y decrece conforme se avanza hacia regiones dominadas por rocas sedimentarias**.

A pesar de esta disponibilidad geológica, el análisis revela que **una fracción reducida** de los bancos alcanza valores altos de ICPB. Para AIFA-Pachuca únicamente **32 bancos** superan los **90/100** (prioridad alta), y en CDMX-Querétaro apenas **18 bancos** lo logran. Este contraste entre abundancia numérica y calidad efectiva confirma que **la principal limitante no es la cantidad de bancos, sino su aptitud técnica para balasto**, especialmente cuando se consideran propiedades como la porosidad, presencia de estructuras y mineralogía adversa.

Finalmente, desde una perspectiva de viabilidad, **la logística emerge como el factor más restrictivo**. Varios de los bancos técnicamente favorables presentan accesos deficientes, restricciones por tenencia de la tierra, ausencia de infraestructura de

procesamiento o distancias poco competitivas hacia los trazos ferroviarios. En consecuencia, el diagnóstico preliminar indica que **la selección final debe integrar no solo parámetros geológicos y geotécnicos, sino también análisis de accesibilidad, madurez operativa y disponibilidad real de reservas explotables.**

6. Discusión y recomendaciones.

6.1. Oportunidades detectadas en la cadena de suministro de materiales pétreos.

El análisis integral de los 1,199 bancos evaluados permitió identificar no solo su potencial para la producción de balasto y materiales de vía férrea, sino también **oportunidades adicionales dentro de la cadena de suministro de agregados**, las cuales pueden representar ventajas estratégicas para los proyectos ferroviarios y para los propios productores ([Tabla 15](#)).

Tabla 15. Oportunidades de aprovechamiento por tipo litológico (adicional a las aplicaciones ferroviarias)

Tipo de roca	No. Bancos	%	Oportunidades principales de aprovechamiento
Ígnea extrusiva (volcánica)	457	38.1	- Agregados para concreto y mezclas asfálticas. - Subbalasto y materiales de terracería. - Aprovechamiento de finos para rellenos y filtros. - Puntos satélite de trituración por su ubicación estratégica.
Sedimentaria (química)	319	26.6	- Estabilización de suelos (suelo-cal). - Prefabricados no estructurales. - Materiales para subrasante y rellenos controlados. - Producción de cal agrícola e industrial.
Ígnea extrusiva (volcanoclástica)	182	15.2	- Agregados para obras inducidas (rellenos, subbase). - Terracerías y mejoramiento de plataformas. - Aprovechamiento de materiales seleccionados para bases hidráulicas de baja demanda.
Sedimentaria (Clástica)	133	11.1	- Prefabricados ligeros y elementos no estructurales. - Rellenos controlados y obras temporales. - Capa filtro en tramos con baja exigencia mecánica.
Ígnea intrusiva (plutónica)	23	1.9	- Agregados de alto desempeño (concreto estructural). - Gravas de alta resistencia para mezclas asfálticas. - Materia prima para piedra dimensionada.
Metamórfica	10	0.8	- Agregados de elevada tenacidad (cuarcitas). - Materiales especiales para proyectos de alta resistencia. - Rellenos y subrasantes mejoradas.

La presencia dominante de **rocas ígneas extrusivas y volcanoclásticas (53.3 %)** demuestra un contexto altamente favorable para expandir la oferta de agregados. Incluso cuando algunas de estas rocas no cumplen con los requisitos más estrictos para balasto (por ejemplo, porosidad elevada, texturas lajeadas o estructuras internas desfavorables) mantienen propiedades mecánicas competitivas que permiten su aprovechamiento en aplicaciones industriales y en obras asociadas al proyecto.

Esto abre la posibilidad de **desarrollar esquemas de aprovechamiento integral**, evitando la subutilización de los bancos y mejorando la rentabilidad operativa de las unidades de producción.

- **Aprovechamiento de finos y subproductos de trituración**

Las operaciones de trituración para la producción de materiales generan volúmenes importantes de finos que, correctamente gestionados, pueden utilizarse para **rellenos, terraplenes, subbases, subrasantes y otras aplicaciones de ingeniería**. Esta acción permite reducir desperdicios, optimizar procesos y agregar valor a materiales que de otro modo serían descartados.

- **Producción de agregados para concreto hidráulico y asfáltico**

Las rocas ígneas extrusivas (basaltos, andesitas) y las ígneas intrusivas (granodioritas, dioritas), aun cuando no califican para balasto, presentan excelentes valores de **resistencia a la compresión, durabilidad y granulometría** para abastecer plantas concretas regionales y producir mezclas asfálticas para carreteras y elementos estructurales no críticos dentro del propio proyecto ferroviario.

- **Abastecimiento de materiales para obras inducidas del propio proyecto ferroviario**

Las obras paralelas al trazo (**puentes, terracerías, obras de drenaje, estabilización de taludes, plataformas logísticas y patios de maquinaria**) demandan grandes volúmenes de agregados. La identificación de bancos cercanos con materiales aptos para **subbase, base, rellenos estructurales y capa filtro** permite reducir costos logísticos y aumentar la autonomía del proyecto.

- **Elaboración de prefabricados: block, tabique, elementos no estructurales**

Las **sedimentarias químicas (319 bancos)** y, en menor medida, las **clásticas (133 bancos)** ofrecen oportunidades para la fabricación de **prefabricados ligeros**, dado que su

variabilidad textural, que las hace poco confiables para balasto, puede ser ventajosa para elementos no estructurales con requerimientos moderados.

- **Materiales para estabilización de suelos y mejoramiento de plataformas**

Las calizas y dolomías, aun con limitaciones para balasto, pueden ser utilizadas como **materiales estabilizantes** (cal agrícola, cal hidratada), componentes para mezclas **suelo-cal** y/o para la mejora de subrasantes con baja capacidad portante.

Su amplia disponibilidad (26.6 % de los bancos) las convierte en un recurso estratégico para tramos críticos del proyecto.

- **Potenciales puntos de acopio y trituración satélite**

Bancos ubicados estratégicamente, aunque sin calidad suficiente para balasto, pueden funcionar como **plataformas intermedias de trituración, precribado o acopio**, optimizando los circuitos logísticos entre bancos de alta calidad y los puntos de vertido del proyecto. Esta estrategia es especialmente útil en zonas donde **la densidad de bancos aptos es baja**, como ocurre en segmentos del proyecto Saltillo-Nuevo Laredo.

6.2. Ventajas de la metodología aplicada.

La metodología desarrollada para la **optimización estratégica de la proveeduría de materiales pétreos** ofrece ventajas sustantivas para la **planeación, evaluación y toma de decisiones** en proyectos ferroviarios de gran escala. Su principal fortaleza radica en la capacidad de integrar, de manera sistemática, **información geológica, logística y operativa** proveniente de fuentes cartográficas, bases de datos especializadas y análisis espaciales de amplio alcance.

En primer término, el modelo permite **realizar una preevaluación técnica y logística altamente eficiente**, concentrando los esfuerzos de campo únicamente en bancos que presentan una probabilidad real de cumplir con los requisitos normativos de balasto, subbalasto y capas de asiento. Esto **reduce de forma directa los costos asociados a campañas de exploración, muestreo y ensayos de laboratorio en bancos con baja viabilidad**.

Asimismo, la metodología incorpora variables clave mediante el ICPB, lo que **establece un sistema de priorización objetivo, transparente y reproducible**. Este enfoque reduce sesgos de selección, homologa criterios entre proyectos y facilita la comunicación técnica con dependencias, clientes y socios estratégicos.

La estructura basada en SIG permite, además, **delimitar eficientemente áreas de búsqueda**, integrar modelos de distancia, analizar coberturas geológicas a gran escala y visualizar en tiempo real la distribución espacial de bancos prospectados. Gracias a ello, es posible identificar zonas críticas, evaluar escenarios logísticos y optimizar rutas de abastecimiento desde fases muy tempranas del proyecto.

Otra ventaja relevante es la **capacidad de actualización y escalabilidad del modelo**. La incorporación de nuevos bancos, resultados de laboratorio o información de campo se realiza de manera inmediata, fortaleciendo el control de calidad de la base de datos y permitiendo ajustes estratégicos en función de los avances del proyecto.

Finalmente, la metodología contribuye a **optimizar recursos y reducir riesgos**: orienta las inspecciones hacia los bancos con mayor potencial, anticipa limitantes geológicas o logísticas, y mejora la planificación de costos y tiempos. De esta manera, los estudios detallados y las inversiones de mayor magnitud se concentran únicamente en aquellos bancos que, desde la evaluación preliminar, muestran condiciones favorables para un suministro confiable, continuo y alineado a los requerimientos de la autoridad ferroviaria.

6.3. Recomendaciones para optimizar la prospección y evaluación.

Derivado del análisis integral de la base de datos, las inspecciones de campo y la evaluación preliminar de los bancos prospectados, se identificaron diversas **áreas de mejora** que permitirían aumentar la precisión predictiva del ICPB, reducir incertidumbre en la toma de decisiones y optimizar los recursos destinados a estudios geológico-operativos. Las recomendaciones principales son las siguientes:

1. Recalibración y validación continua del ICPB.

El ICPB debe tratarse como un **modelo dinámico**. Su desempeño depende de la calidad de los datos y de qué tan bien reflejen las condiciones reales del material en cada banco. Por ello, es indispensable un proceso sistemático de **recalibración**, alimentado por resultados de campo, discrepancias litológicas detectadas y desempeño real del material después de su trituración o ensayo.

La validación continua permitirá ajustar las ponderaciones de variables como porosidad, estructura interna, mineralogía crítica y densidad, evitando sesgos y mejorando progresivamente la capacidad predictiva del índice. Este proceso es particularmente importante cuando se incorporen bancos recién ingresados a la base de datos o cuando se disponga de resultados de laboratorio en bancos estratégicos.

2. Tratamiento especializado para bancos de caliza.

El comportamiento mecánico de las calizas no puede evaluarse adecuadamente mediante la versión actual del ICPB, en tanto que éste ha sido diseñado para rocas ígneas y metamórficas de estructura masiva. En contraste, las calizas presentan una **heterogeneidad inherente** a su origen sedimentario, con variaciones abruptas de textura, porosidad y grado de cementación que dependen directamente de su facies deposicional y de sus microfacies.

La correcta evaluación de estos materiales requiere un **enfoque sedimentológico y petrográfico**. La distinción entre **facies** (a escala macroscópica, siguiendo esquemas como el modelo de facies de Wilson) y **microfacies** (a escala petrográfica) es esencial, pues muchas de las propiedades que controlan la resistencia (como la relación entre micrita y espatita, tipo de porosidad o contenido de arcilla) solo pueden identificarse en lámina delgada.

En este sentido, las **clasificaciones de Dunham y Folk** constituyen herramientas clave para caracterizar el soporte (por granos o por matriz), la composición, la textura y el tipo de cementación. Su aplicación permite diferenciar calizas competentes (*grainstones*, *packstones* bien cementados) de materiales de baja capacidad mecánica (*mudstones* y *wackestones* con alto contenido arcilloso o micrítico). A partir de esta problemática, se identifican distintas líneas de acción:

- **Integrar al ICPB actual conceptos derivados de los modelos de facies carbonatadas**, especialmente para ambientes de plataforma y talud, donde la variabilidad textural y mecánica puede cambiar drásticamente en distancias muy cortas. En zonas de talud es frecuente encontrar mayor aporte terrígeno, incremento de arcillas y micrita, menor cementación y cambios litológicos bruscos que impactan directamente la calidad y la continuidad del minado.
- **Establecer un protocolo mínimo de caracterización para propietarios de bancos**, considerando que normalmente carecen de estudios sedimentológicos formales. Este protocolo debe incluir una evaluación básica de dureza, descripción con lupa de mano, reacción con ácido clorhídrico al 10 %, registro fotográfico sistemático del frente de explotación y estimación visual de la porosidad y fracturación.
- **Desarrollar un submodelo específico de calizas como herramienta independiente**, con ponderaciones propias y rangos de decisión acordes a la naturaleza de estos materiales. Este submodelo debe incorporar parámetros medibles en campo y laboratorio de bajo costo (clasificación Dunham rápida, porosidad primaria, fracturación, tipo de soporte, reacción ácido simple), con

opción de integrarse con análisis petrográficos cuando el proyecto lo amerite. Este enfoque permitirá una evaluación más consistente y científica del potencial de las calizas dentro de la cadena de suministro de agregados ferroviarios.

3. Refinamiento del modelo de distancias logísticas.

El cálculo de distancias puede (y debe) evolucionar más allá de la estimación lineal, incorporando rutas carreteras efectivas, nodos de acopio, patios ferroviarios, accesos estacionales y **condiciones reales de tránsito**. Asimismo, conviene integrar la disponibilidad de transporte (carretero o ferroviario) como variable logística. Con ello, el índice no solo expresará la cercanía geométrica, sino el **costo logístico real asociado al suministro de material**.

4. Especialización operativa en SIG y Geología.

La calidad del repositorio depende directamente de la **precisión geológica y cartográfica**. Por ello, resulta conveniente asignar personal especializado en interpretación geológica y revisión de cartas, capaz de **depurar unidades mal clasificadas o inconsistentes**. De igual manera, un equipo SIG dedicado aseguraría la **producción constante de cartografía de alta resolución**, con simbologías estandarizadas y análisis espaciales robustos, evitando retrasos y mejorando la consistencia del modelo.

5. Incorporación de análisis automatizados.

El **volumen de datos geológicos, logísticos y operativos** ya disponible abre la puerta a la automatización. La **clasificación asistida** mediante imágenes satelitales, los modelos de similitud litológica y los algoritmos predictivos para estimar calidad y reservas permitirían acelerar la prospección y reducir errores humanos. Estas herramientas también facilitarían la detección de patrones regionales que todavía no se reflejan en el ICPB actual.

6. Integración de análisis de riesgos operativos y socioambientales.

La selección de bancos no puede limitarse a criterios técnicos; es necesario integrar sistemáticamente consideraciones sobre restricciones ambientales (ANPs, uso de suelo, condicionantes de MIA), tenencia de la tierra y riesgos operativos asociados a accesos, energía, agua o maquinaria. Estos factores condicionan la viabilidad real de explotación y deben incorporarse desde etapas tempranas para evitar esfuerzos prospectivos en bancos inviables.

7. Estandarización del intercambio de información con productores.

Finalmente, conviene establecer un **protocolo uniforme de verificación y reporte** por parte de los propietarios de los bancos. **Fichas técnicas estandarizadas, evidencia fotográfica, reportes de maquinaria y reservas verificables** permiten mejorar la calidad de la información inicial, reducir la incertidumbre comercial y agilizar la toma de decisiones en proyectos de gran escala.

7. Conclusiones.

7.1. Aporte directo a los proyectos ferroviarios AIFA-Pachuca, CDMX-Querétaro y Saltillo-Nuevo Laredo.

La metodología aplicada permitió evaluar, con base en evidencia cartográfica, petrográfica y logística, más de 1,199 bancos distribuidos en una superficie aproximada de 1,033,051 km², generando un **panorama integral de la disponibilidad y calidad de agregados pétreos** para los tres proyectos. Este ejercicio redujo de forma sustancial la incertidumbre inicial y permitió **identificar regiones con mayor potencial real para abastecimiento**, particularmente en el CVTM para los corredores centrales y en la PAOM para el SNL. El análisis preliminar demuestra que existe oferta limitada pero suficiente para cubrir las necesidades de balasto, subbalasto y capas de asiento, aunque distribuida de forma desigual a nivel nacional.

7.2. Fortalecimiento metodológico y operativo.

La construcción del ICPB, el uso sistemático de SIG, la digitalización exhaustiva de cartas geológico-minerales y la elaboración de bases de datos multipropósito consolidaron un modelo interno que **posiciona a la empresa con ventaja competitiva frente a consultoras tradicionales**. La capacidad de integrar datos geológicos, mineros, logísticos y de infraestructura convierte este documento en una herramienta estratégica para la toma de decisiones comerciales y técnicas. Este trabajo estableció una plataforma sólida para evaluar bancos con un nivel de consistencia inédita en la empresa.

7.3. Eficiencia en la prospección y reducción de costos exploratorios.

La metodología desarrollada permite **filtrar de manera temprana** bancos con baja probabilidad de éxito, reservando las visitas de campo y el trabajo operativo para aquellos con mayor potencial. Esto representa una **disminución significativa en costos de exploración, viajes, ensayos de laboratorio y tiempo operativo**. La capacidad predictiva del ICPB (aunque perfectible) demuestra utilidad inmediata al correlacionar propiedades geológicas con desempeño esperado, evitando inversiones innecesarias en bancos con características desfavorables.

7.4. Validación del enfoque geológico como pilar de la evaluación de agregados.

El análisis evidencia que las **propiedades petrográficas y texturales** son determinantes en la prospección de bancos de balasto. Esto coincide con la literatura internacional y respalda la pertinencia de la metodología adoptada.

7.5. Identificación de limitantes clave: logística, infraestructura y heterogeneidad litológica.

Aunque la calidad geológica de numerosos bancos es adecuada, la logística emergió como el **principal obstáculo operativo**: accesos deficientes, falta de infraestructura de trituración, reservas inciertas y distancias elevadas reducen la viabilidad real de muchos sitios. Asimismo, el análisis confirma la **alta variabilidad en calizas**, donde la heterogeneidad sedimentaria limita la aplicación del ICPB y exige enfoques diferenciados.

7.6. Necesidad de un modelo especializado para calizas.

La investigación reveló una carencia crítica: el ICPB no puede evaluar con justicia bancos carbonatados debido a su **complejidad textural y a la escasez de información sedimentológica**. Se concluye que es necesario desarrollar un **submodelo especializado** con parámetros propios, integrando facies, microfacies, clasificación Dunham/Folk, cementación y tipos de porosidad. Esta herramienta permitiría evaluar de forma más científica el potencial de las calizas en proyectos futuros.

7.7. Aportaciones estratégicas a la cadena de suministro de materiales.

El análisis litológico general demuestra un **volumen significativo de bancos** que, aunque no aptos para balasto, sí son **competitivos para otros segmentos de la cadena de agregados**: prefabricados, concreto hidráulico, mezclas asfálticas, estabilización de suelos, terracerías, rellenos y acopios satélite. Esto permite aprovechar la totalidad del banco y genera oportunidades comerciales para los propietarios y para los proyectos ferroviarios.

7.8. Transformación del enfoque prospectivo en proyectos de infraestructura ferroviaria.

El trabajo demuestra que el estudio geológico sistemático, reforzado con SIG y bases de datos estructuradas, puede convertirse en un **mecanismo replicable y eficiente** para cualquier proyecto ferroviario nacional. La metodología es completamente trasladable a los trazos incluidos en el programa federal 2024–2030 y puede ampliarse para el análisis de proyectos carreteros, logísticos o energéticos.

7.9. Contribución global del proyecto.

En suma, este trabajo proporciona un **mapa integral, sistemático y técnicamente sustentado** del potencial pétreo para los proyectos AIFA-Pachuca, CDMX-Querétaro y Saltillo-Nuevo Laredo. La metodología crea un estándar interno que combina rigor técnico, eficiencia logística y visión estratégica, y establece un marco sólido para la selección,

negociación y aseguramiento de fuentes de suministro en proyectos ferroviarios presentes y futuros.

8. Referencias.

- ADIF. (2007, enero). *Pliego de prescripciones técnicas para el suministro y utilización del balasto* (7a. ed.). Administrador de Infraestructuras Ferroviarias.
- Adomako, S., Engelsen, C. J., Thorstensen, R. T., y Barbieri, D. M. (2021, enero 12). Review of the relationship between aggregates geology and Los Angeles and micro-Deval tests. *Bulletin of Engineering Geology*, 80, 1963-1980. <https://doi.org/10.1007/s10064-020-02097-y>
- Aguirre-Díaz, G. d. J., Zúñiga-Dávila, R., Pacheco-Alvarado, F. J., y Obregón, J. N. (2000, marzo 01). El graben de Querétaro, México. Observaciones de fallamiento activo. *GEOS*, 20(1), 2-7. <https://geos.cicese.mx/index.php/geos/article/view/409>
- Andrade, G. F. S. M. d., Dieguez, C. A., Lima, B. T., y Guimarães, A. C. R. (2024). Evaluation of limestone aggregates for railway ballast: particle characteristics and shear strength analysis. *Soils and Rocks*, 47(4). 10.28927/SR.2024.011223
- AREMA. (2021). *Manual for Railway Engineering* (Vol. 1). American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association.
- ARTF. (2022, marzo 11). *Lineamientos para los materiales que son empleados en el balasto ferroviario para tráfico de pasajeros y mixto*. Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes (SICT). https://www.gob.mx/artf/documentos/lineamiento_para_balasto
- ARTF. (2025, mayo 24). *Norma Oficial Mexicana NOM-003-ARTF-2023, Sistema Ferroviario-Seguridad-Clasificación y Especificaciones de Vía*. Diario Oficial de la Federación. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5728410&fecha=24/05/2024#gsc.tab=0
- Claissse, P., y Calla, C. (2006, mayo 01). Rail ballast: Conclusions from a historical perspective. *Proceedings of the ICE - Transport*, 159(2), 69-74. <https://doi.org/10.1680/tran.2006.159.2.69>
- Diario Oficial de la Federación. (2023, noviembre 20). *Decreto por el que se declara área prioritaria para el desarrollo nacional, la prestación del servicio público de transporte ferroviario de pasajeros en el Sistema Ferroviario Mexicano*. Diario Oficial de la Federación. https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5708967&fecha=20/11/2023#gsc.tab=0
- Diógenes, D. F., Castelo-Branco, V. T. F., Nogueira-Neto, J. A., y Motta, L. M. G. (2022, septiembre 12). An assessment of the relationship between the petrographic, physical, and morphological properties of aggregates used for railway ballast. *Construction and Building Materials*, 347. ScienceDirect. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128345>
- Ferrari, L., Orozco-Esquivel, M. T., Manea, V., y Manea, M. (2012, febrero 5). The dynamic history of the Trans-Mexican Volcanic Belt and the Mexico subduction zone. *Tectonophysics*, 522, 122-149. ScienceDirect. 10.1016/j.tecto.2011.09.018
- Gobierno de México. (2025, septiembre). *Tren México-Pachuca. Tramo AIFA-Pachuca*. Proyectos México. <https://www.proyectosmexico.gob.mx/ppp06-tren-mexico-pachuca/>
- Gobierno de México. (2025, octubre). *Tren México Querétaro. Primera etapa*. Proyectos México. <https://www.proyectosmexico.gob.mx/ppp07-tren-mexico-queretaro/>

- Gobierno de México. (2025, noviembre 07). *Construcción de la vía férrea para prestar el servicio de transporte de pasajeros Saltillo-Nuevo Laredo en los estados de Coahuila, Nuevo León y Tamaulipas*. Proyectos México.
https://www.proyectosmexico.gob.mx/proyecto_inversion/0960-tren-salttillo-nuevo-laredo/
- Gómez-Tuena, A., Orozco-Esquivel, M. T., y Ferrari, L. (2005). Igneous petrogenesis of the Transmexican Volcanic Belt. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 57(3), 227-283.
<https://doi.org/10.18268/bsgm2005v57n3a2>.
- Guo, Y., Xie, J., Fan, Z., Markine, V., Connolly, D. P., y Jing, G. (2022, agosto 15). Railway ballast material selection and evaluation: A review. *Construction and Building Materials*, 344. ScienceDirect. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128218>
- Hernández-Rojas, J. (2007, noviembre). *Reconstrucción de la dinámica eruptiva de la Pómez Ezequiel Montes, Qro.* [Tesis de Maestría]. UNAM.
<https://hdl.handle.net/20.500.14330/TES01000626517>
- Hiriart, P. (2023, marzo 1). Tren Maya: Llega balasto de Cuba para construcción... pero sin permisos ambientales. *El Financiero*.
<https://www.elfinanciero.com.mx/nacional/2023/03/01/tren-maya-llega-balasto-de-cuba-par-a-construccion-pero-sin-permisos-ambientales>
- Leal-Cuéllar, V. A. (2024). *Implicaciones geotectónicas a escala regional del magmatismo alcalino de la Sierra de San Carlos-Cruillas, NE de México* [Tesis Doctoral]. UANL.
<http://eprints.uanl.mx/27590/1/1080312922.pdf>
- López-Doncel, R. (2003). La Formación Tamabra del Cretácico medio en la porción central del margen occidental de la Plataforma Valles-San Luis Potosí. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 20(1), 1-19. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=5722010>
- Presidencia de la República. (2024, noviembre 28). *Anuncia Gobierno de México inversión de 157 mil mdp en 2025 para la construcción de trenes de pasajeros*. Gob MX.
<https://www.gob.mx/presidencia/prensa/anuncia-gobierno-de-mexico-inversion-de-157-mil-mdp-en-2025-para-la-construccion-de-trenes-de-pasajeros>
- Rico-Rodríguez, A., Orozco y Orozco, J. M., Téllez-Gutiérrez, R., y Pérez-García, A. (1991). *Manual de calidad para materiales en la sección estructural de vías férreas*. Instituto Mexicano del Transporte. <https://www.imt.mx/archivos/publicaciones/documentotecnico/dt2.pdf>
- Soler-Arechalde, A. M. (1990, noviembre). *Paleomagnetismo de la región de Acambay. Faja Volcánica Transmexicana* [Tesis de Maestría]. UNAM.
<https://hdl.handle.net/20.500.14330/TES01000165404>
- Viera-Décida, F., Ramírez-Fernández, J. A., Velasco-Tapia, F., y Orozco-Esquivel, M. T. (2009, marzo). Relaciones petrogenéticas del magmatismo en la Provincia Alcalina Oriental Mexicana. *Ciencia UANL*, 12(1), 42-49. <http://eprints.uanl.mx/id/eprint/2078>
- Watters, B. R., Klassen, M. J., y Clifton, A. W. (1987). Evaluation of Ballast Materials Using Petrographic Criteria. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (1131), 45-63. <http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/trr/1987/1131/1131-006.pdf>