

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL



TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

TEMA: ESTUDIO ESTADÍSTICO DE LA RELACIÓN ENTRE EL ÍNDICE CBR Y EL MÓDULO DE YOUNG EN MATERIALES GRANULARES DE DIECIOCHO MINAS DEL ECUADOR: INSUMO TÉCNICO PARA EL DISEÑO DE PAVIMENTOS FLEXIBLES.

AUTOR:

JEAN SEBASTIAN NIAMA SEGURA

TUTOR:

ING. WILSON OSWALDO CANDO TIPAN

QUITO DM, 2025

3.4.	Variable a estudiar	35
3.5.	Técnicas estadísticas aplicadas.....	36
3.5.1.	Estadística descriptiva	37
3.5.2.	Distribuciones de frecuencia.....	38
3.5.3.	Correlación y regresión	39
3.5.4.	Cálculo de error porcentual y estimaciones.....	40
3.5.5.	Representación gráfica	40
CAPÍTULO IV.....		41
4.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	41
4.1.	Estadística descriptiva por tipo de capa y global.....	41
4.1.1.	Media.....	41
4.1.2.	Mediana	42
4.1.3.	Moda.....	44
4.1.4.	Varianza.....	44
4.1.5.	Desviación estándar.....	45
4.1.6.	Rango.....	47
4.1.7.	Rango intercuartílico (IQR).....	48
4.2.	Análisis de frecuencias e histogramas	49
4.2.1.	Frecuencia global	50
4.2.2.	Histograma.....	52
4.2.2.1.	Intervalo Base Clase 1.....	52
4.2.2.2.	Intervalo Base Clase 2.....	54
4.2.2.3.	Intervalo Base Clase 3.....	56

4.2.2.4.	Intervalo Base Clase 4.....	57
4.2.2.5.	Intervalo Subbase Clase 1	59
4.2.2.6.	Intervalo Subbase Clase 2	61
4.2.2.7.	Intervalo Subbase Clase 3	63
4.3.	Análisis de correlación y regresión.....	65
4.3.1.	Resultados generales	65
4.3.1.1.	Modelo regresión lineal	65
4.3.1.1.	Modelo exponencial.....	67
4.3.1.2.	Modelo logarítmico.....	68
4.3.1.3.	Modelo polinómico de segundo grado.....	68
4.3.1.4.	Modelo polinómico de tercer grado.....	69
4.3.1.5.	Comparación de resultados generales	71
4.3.2.	Resultados por tipo de capa	71
4.3.2.1.	Modelo regresión lineal – Base Clase 3.....	71
4.3.2.2.	Modelo regresión exponencial – Base Clase 3.....	73
4.3.2.3.	Modelo regresión logarítmico – Base Clase 3.....	74
4.3.2.4.	Modelo regresión polinómico de segundo grado – Base Clase 3	75
4.3.2.5.	Modelo regresión polinómico de tercer grado – Base Clase 3	77
4.3.2.6.	Modelo regresión lineal – Subbase Clase 3	78
4.3.2.7.	Modelo regresión exponencial – Subbase Clase 3	79
4.3.2.8.	Modelo regresión logarítmico – Subbase Clase 3	80

4.3.2.9. Modelo regresión polinómico de segundo grado – Subbase Clase 3	81
4.3.2.10. Modelo regresión polinómico de tercer grado – Subbase Clase 3 83	
4.3.2.11. Comparación de resultados por tipo de capa.....	84
4.4. Análisis de resultados	85
4.4.1. Utilidad de los modelos.....	86
CAPÍTULO V.....	88
5. DISCUSIÓN	88
5.1. Comparación con estudios previos	88
5.2. Análisis crítico de los resultados	89
5.3. Implicaciones para el diseño estructural de pavimentos	90
CAPÍTULO VI.....	93
6. CONCLUSIONES	93
7. RECOMENDACIONES.....	95
8. REFERENCIAS.....	96
9. ANEXOS	100
9.1. Correlación entre el CBR y Módulo de Young para materiales de Base y Subbase.....	100

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. <i>Resultados de CBR y Módulo de Young para las clases de material de la Cantera San Joaquín (Santa Rita).</i>	25
Tabla 2. <i>Resultados de CBR y Módulo de Young para las clases de material de la Mina Compañía JHV (Tena).</i>	26
Tabla 3. <i>Resultados de CBR y Módulo de Young para las clases de material de la Mina Doña Meche (Esmeraldas).</i>	26
Tabla 4. <i>Resultados de CBR y Módulo de Young para las clases de material de la Mina La China (Quevedo).</i>	27
Tabla 5. <i>Resultados de CBR y Módulo de Young para las clases de material de la Mina de Macas (Macas).</i>	27
Tabla 6. <i>Resultados de CBR y Módulo de Young para las clases de material de la Mina del Coca (Coca).</i>	28
Tabla 7. <i>Resultados de CBR y Módulo de Young para las clases de material de la Mina Materiales Pétreos R/R (Cantera Ramírez)</i>	28
Tabla 8. <i>Resultados de CBR y Módulo de Young para las clases de material de la Mina Mulaló (Cotopaxi).</i>	29
Tabla 9. <i>Resultados de CBR y Módulo de Young para las clases de material de la Mina Picoazá (Portoviejo).</i>	30
Tabla 10. <i>Resultados de CBR y Módulo de Young para las clases de material de la Mina Punto Azul (Ibarra).</i>	30
Tabla 11. <i>Resultados de CBR y Módulo de Young para las clases de material de la Mina San Luis Cananvalle (Tabacundo).</i>	31

Tabla 12. <i>Resultados de CBR y Módulo de Young para las clases de material de la Mina Segundo (Latacunga)</i>	31
Tabla 13. <i>Resultados de CBR y Módulo de Young para las clases de material de la Mina Vargas Soria (Baños)</i>	32
Tabla 14. <i>Resultados de CBR y Módulo de Young para las clases de material de la Mina Wiliselzu CIA. LTDA. (Puyo)</i>	33
Tabla 15. <i>Resultados de CBR y Módulo de Young para las clases de material de la Mina La Chimba (Cayambe)</i>	33
Tabla 16. <i>Resultados de CBR y Módulo de Young para las clases de material de la Mina Loma de Cuniburo (Cayambe)</i>	34
Tabla 17. <i>Resultados de CBR y Módulo de Young para las clases de material de la Mina Malca 3 (Catamayo)</i>	34
Tabla 18. <i>Resultados de CBR y Módulo de Young para las clases de material de la Mina Malca 4 (Catamayo)</i>	35
Tabla 19. <i>Media general de CBR y Módulo de Young en materiales granulares de las minas estudiadas</i>	42
Tabla 20. <i>Mediana general de CBR y Módulo de Young en materiales granulares de las minas estudiadas</i>	43
Tabla 21. <i>Varianza general de CBR y Módulo de Young en materiales granulares de las minas estudiadas</i>	45
Tabla 22. <i>Desviación estándar general de CBR y Módulo de Young en materiales granulares de las minas estudiadas</i>	46

Tabla 23. <i>Rango general de CBR y Módulo de Young en materiales granulares de las minas estudiadas.</i>	48
Tabla 24. <i>Rango intercuartílico general de CBR y Módulo de Young en materiales granulares de las minas estudiadas.</i>	49
Tabla 25. <i>Frecuencia global de CBR en materiales granulares de las minas estudiadas.</i>	50
Tabla 26. <i>Frecuencia global del Módulo de Young en materiales granulares de las minas estudiadas.</i>	51
Tabla 27. <i>Frecuencia CBR y Módulo de Young - Base Clase 1.</i>	53
Tabla 28. <i>Frecuencia CBR y Módulo de Young - Base Clase 2.</i>	54
Tabla 29. <i>Frecuencia CBR y Módulo de Young - Base Clase 3.</i>	56
Tabla 30. <i>Frecuencia CBR y Módulo de Young - Base Clase 4.</i>	58
Tabla 31. <i>Frecuencia CBR y Módulo de Young - Subbase Clase 1</i>	60
Tabla 32. <i>Frecuencia CBR y Módulo de Young - Subbase Clase 2.</i>	62
Tabla 33. <i>Frecuencia CBR y Módulo de Young - Subbase Clase 3.</i>	64
Tabla 34. <i>Ecuaciones lineales y no lineales obtenidos de las gráficas</i>	71
Tabla 35. <i>Ecuaciones modelo y R^2 para la Base Clase 3.</i>	84
Tabla 36. <i>Ecuaciones modelo y R^2 para la Subbase Clase 3.</i>	84

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. <i>Histograma de frecuencia del CBR y Módulo de Young - Base Clase 1</i>	54
Figura 2 <i>Histograma de frecuencia del CBR y Módulo de Young - Base Clase 2</i>	55
Figura 3. <i>Histograma de frecuencia del CBR y Módulo de Young - Base Clase 1</i>	57
Figura 4. <i>Histograma de frecuencia del CBR y Módulo de Young - Base Clase 4</i>	59
Figura 5. <i>Histograma de frecuencia del CBR y Módulo de Young - Subbase Clase 1</i>	61
Figura 6. <i>Histograma de frecuencia del CBR y Módulo de Young - Subbase Clase 2</i>	63
Figura 7. <i>Histograma de frecuencia del CBR y Módulo de Young - Subbase Clase 3</i>	65
Figura 8. <i>Correlación lineal general entre el CBR y el Módulo de Young</i>	66
Figura 9. <i>Modelo exponencial general entre el CBR y el Módulo de Young</i>	67
Figura 10. <i>Modelo logarítmico general entre el CBR y el Módulo de Young</i>	68
Figura 11. <i>Modelo polinómico de segundo grado general entre el CBR y el Módulo de Young</i>	69
Figura 12. <i>Modelo polinómico de tercer grado general entre el CBR y el Módulo de Young</i>	70
Figura 13. <i>Correlación lineal entre el CBR y Módulo de Young en la Base Clase 3</i>	72
Figura 14. <i>Modelo exponencial entre el CBR y Módulo de Young para la Base Clase 3</i>	73
Figura 15. <i>Modelo logarítmico entre el CBR y Módulo de Young para la Base Clase 3</i>	75
Figura 16. <i>Modelo polinómico de segundo grado entre el CBR y Módulo de Young para la Base Clase 3</i>	76
Figura 17. <i>Modelo polinómico de tercer grado entre el CBR y Módulo de Young para la Base Clase 3</i>	78
Figura 18. <i>Correlación lineal entre el CBR y Módulo de Young en la Subbase Clase 3</i>	79
Figura 19. <i>Modelo exponencial entre el CBR y Módulo de Young para la Subbase Clase 3</i>	80
Figura 20. <i>Modelo logarítmico entre el CBR y Módulo de Young para la Subbase Clase 3</i>	81

Figura 21. <i>Modelo polinómico de segundo grado entre el CBR y Módulo de Young para la Subbase Clase 3.</i>	82
Figura 22. <i>Modelo polinómico de tercer grado entre el CBR y Módulo de Young para la Subbase Clase 3.</i>	83
Figura 23. <i>Comparación de los coeficientes de regresión lineal entre CBR y Módulo de Young para la Base Clase 1.</i>	100
Figura 24. <i>Comparación de los coeficientes de regresión lineal entre CBR y Módulo de Young para la Base Clase 2.</i>	101
Figura 25. <i>Comparación de los coeficientes de regresión lineal entre CBR y Módulo de Young para la Base Clase 3.</i>	102
Figura 26. <i>Comparación de los coeficientes de regresión lineal entre CBR y Módulo de Young para la Base Clase 4.</i>	103
Figura 27. <i>Comparación de los coeficientes de regresión lineal entre CBR y Módulo de Young para la Subbase Clase 1.</i>	104
Figura 28. <i>Comparación de los coeficientes de regresión lineal entre CBR y Módulo de Young para la Subbase Clase 2.</i>	105
Figura 29. <i>Comparación de los coeficientes de regresión lineal entre CBR y Módulo de Young para la Subbase Clase 3.</i>	106

CAPÍTULO I

1. GENERALIDADES

1.1. Justificación

En el diseño y construcción de pavimentos flexibles, las capas de base y subbase deben cumplir con parámetros técnicos que aseguren su desempeño bajo cargas de tránsito y condiciones ambientales específicas. Los ensayos más comúnmente utilizados para evaluar estas capas son el Índice CBR (California Bearing Ratio) y el Módulo de Young, los cuales permiten cuantificar la resistencia a la penetración y la rigidez elástica del material, respectivamente.

De acuerdo con la metodología desarrollada del MTOP (Ministerio de Transporte y Obras Públicas) el ensayo CBR es comúnmente utilizado para el diseño de pavimentos en Ecuador, mientras que el Módulo de Young, fue obtenido en todas las minas, mediante el equipo GeoGauge, dando el comportamiento elástico de los materiales no confinados.

Si bien ambos ensayos son utilizados con mayor frecuencia en el país, no se ha realizado un análisis estadístico a la relación entre los resultados de los materiales provenientes de las distintas minas del país. La falta de la correlación entre el CBR y el Módulo de Young impide que sea necesario realizar ambos ensayos, generando que exista una dependencia de metodologías y limitando el diseño.

En el presente trabajo se pretende llevar a cabo la información mediante la recopilación, procesamiento y análisis de resultados de CBR y el Módulo de Young de las catorce minas del Ecuador. Utilizando técnicas estadísticas, que ayuden a entender el comportamiento conjunto de estos parámetros.

Este análisis facilitará de mejor forma en la toma de decisiones para el diseño de pavimento flexible a laboratorios de suelos, instituciones públicas, empresas privadas y proyectistas,

contribuyéndoles una base de datos sobre las distintas minas a nivel nacional que optimice los procesos de selección de materiales en función de los requerimientos sobre sus características reales.

1.2. Alcance

El presente trabajo de titulación está enfocado en el análisis comparativo de los datos recopilados de materiales granulares utilizados en distintas minas y canteras del Ecuador, mediante los ensayos de laboratorio de CBR y Módulo de Young, aplicados al diseño de estructuras de pavimento.

La investigación se basa en resultados de ensayos de laboratorio previamente realizados, por lo que no contempla la recolección directa de muestras ni la ejecución de nuevos ensayos en las minas o canteras del país. Se trabajará con información técnica disponible en trabajos de titulación e informes realizados en la PUCE, así como otras fuentes válidas, priorizando su tratamiento estadístico.

Se aplicarán técnicas estadísticas para establecer relaciones funcionales entre ambos parámetros (CBR y Módulo de Young), con el objetivo de generar una herramienta de apoyo técnico que facilite su aplicación en el diseño estructural de pavimentos.

Este estudio no busca reemplazar ni restar validez a los ensayos de laboratorio, sino contribuir como un criterio técnico complementario que optimice su aplicación, permita la generación de bases de datos referenciales y reduzca la necesidad de ensayos redundantes en etapas tempranas de diseño. Adicionalmente, se espera que el presente trabajo sirva como referencia para futuras investigaciones y análisis aplicables a otras minas y regiones del Ecuador.

Minas de estudio:

1. MINA PUNTO AZUL (IBARRA - IMBABURA) (Coronel, 2019)

2. MINA VARGAS SORIA (BAÑOS)(Vaca, 2019)
3. MINA MULALÓ (COTOPAXI)(Alvarado, 2019)
4. MINA LA CHINA (QUEVEDO – LOS RÍOS) (Zambrano, 2019)
5. MINA WILISELZU CIA. LTDA. (PUYO - PASTAZA) (Ocaña, 2019)
6. MINA COMPAÑÍA JHV (TENA - NAPO) (Pazmiño, 2019)
7. CANTERA SAN JOAQUÍN (SANTA RITA - COTOPAXI) (Urquizo, 2019)
8. MINA SAN LUIS CANANVALLE (TABACUNDO - PICHINCHA)(Alvear, 2019)
9. MINA DE MACAS (MACAS – MORONA SANTIAGO) (Cox & Gómez, 2019)
10. MINA DEL COCA (COCA- ORELLANA)(Cox & Gómez, 2019)
11. MINA PICOAZÁ (PORTOVIEJO – MANABÍ) (Ríos, 2019)
12. MINA MALCA 3 (CATAMAYO - LOJA)(Palacios & Panchi, 2019)
13. MINA MALCA 4 (CATAMAYO - LOJA)(Palacios & Panchi, 2019)
14. MINA MATERIALES PÉTREOS R/R (CANTERA RAMIREZ, AMBUQUÍ -
IMBABURA)(Tafur, 2020)
15. MINA DOÑA MECHE (ESMERALDAS – ESMERALDAS)(Meneses, 2023)
16. MINA SEGUNDO (LATACUNGA – COTOPAXI)(Maila, 2022)
17. MINA LA CHIMBA (CAYAMBE - PICHINCHA)(Echeverría & Bastidas, 2019)
18. MINA LOMA DE CUNIBURO (CAYAMBE - PICHINCHA)(Echeverría & Bastidas,
2019)

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

Establecer una relación estadística entre los valores de CBR y el Módulo de Young obtenidos en trabajos de titulación previos, aplicados a materiales granulares de dieciocho minas

del Ecuador, con el fin de generar un modelo comparativo útil para el diseño estructural de pavimentos.

1.3.2. Objetivo Específico

- Recopilar los resultados de ensayos de laboratorio de CBR y Módulo de Young provenientes de trabajos de titulación realizados en la PUCE, aplicados a materiales de diferentes minas del país.
- Estructurar una base de datos comparativa de los materiales, clasificándolos según su origen, tipo de capa (base o subbase) y condiciones de ensayo.
- Aplicar técnicas estadísticas descriptivas y de correlación para identificar posibles relaciones funcionales entre ambos parámetros.
- Interpretar los resultados obtenidos para determinar su aplicabilidad en el diseño estructural de pavimentos flexibles.

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Materiales granulares para estructuras de pavimentos

Los materiales granulares son componentes fundamentales en las capas estructurales de los pavimentos flexibles, particularmente en las capas de base y subbase, que cumplen una función vital en este tipo de estructura vial. Se caracterizan por estar compuestos por partículas de roca triturada, grava, arena o mezclas naturales, las cuales pueden compactarse para formar una estructura resistente y estable frente a las cargas para las que ha sido diseñado el pavimento (López & García, 2015; AASHTO, 1993).

Desde el punto de vista ingenieril, su principal función es transmitir y distribuir las cargas provenientes del tráfico hacia las capas inferiores, especialmente la subrasante. Para que este objetivo se cumpla eficazmente, los materiales granulares deben presentar propiedades físicas y mecánicas adecuadas, como granulometría controlada, alta resistencia al esfuerzo cortante, buena capacidad de soporte y adecuada compactibilidad, lo que permitió la estructura mantenga sus propiedades con el paso del tiempo y el tránsito de los ejes vehiculares (Ministerio de Transporte y Obras Públicas del Ecuador, 2012).

La selección de estos materiales no solo depende de su disponibilidad local, sino también de su comportamiento frente a cargas repetidas, humedad y condiciones de drenaje. En la práctica, estos materiales, se ensayan mediante procedimientos estandarizados, como el ensayo CBR, que permite determinar su capacidad de soporte (ASTM D1883, 2020). Adicionalmente, se pueden utilizar parámetros mecánicos como el Módulo de Young, el cual refleja la rigidez del suelo frente a cargas repetitivas (ASTM D6758, 2020). Ambos criterios permiten una caracterización más

completa del comportamiento estructural de los materiales granulares, y su relación es objeto de análisis en investigaciones recientes orientadas al diseño racional de pavimentos (Meneses, 2023).

2.1.1. Función de las capas granulares en pavimentos flexibles

Las capas granulares, como la base y subbase, cumplen una función estructural esencial dentro de los pavimentos flexibles. Su principal propósito es distribuir las cargas inducidas por el tránsito hacia las capas inferiores, reduciendo así la tensión que llega a la subrasante y prolongando la vida útil del sistema vial (Braja M. Das, 2011; López & García, 2015).

La capa base, ubicada inmediatamente debajo de la carpeta asfáltica, actúa como un soporte estructural intermedio, brindando rigidez y resistencia adicional al sistema. Esta capa debe poseer una alta capacidad de soporte y buena calidad granulométrica para evitar deformaciones permanentes y posibles agrietamientos (Ministerio de Transporte y Obras Públicas del Ecuador, 2012).

Por otra parte, la subbase proporciona una transición entre la base y la subrasante. Aunque generalmente está compuesta por materiales de menor calidad que la base, su función no es menos importante, ya que contribuye al drenaje, a la disipación de tensiones y a mejorar el comportamiento general de la estructura frente a cargas repetidas (AASHTO, 1993).

Ambas capas también cumplen una función clave en el control de humedad, siempre y cuando se hayan sido compactadas adecuadamente y se haya respetado el diseño, empleando el material correspondiente a cada capa. Al proporcionar un entorno más estable para la subrasante, ayudan a mantener sus propiedades mecánicas, evitando que se deteriore rápidamente bajo condiciones climáticas adversas o tráfico pesado.

En conjunto, las capas granulares garantizan que el pavimento funcione como un sistema estructurado, reduciendo deformaciones, distribuyendo esfuerzos, aumentando la durabilidad del diseño y, no menos importante, proporcionando seguridad al usuario durante el tránsito.

2.1.2. Requisitos técnicos según normativa ecuatoriana (NEVI-MTOP)

La normativa ecuatoriana vigente para el diseño y construcción de pavimentos, conocida como NEVI 12 – MTOP (Normas Ecuatorianas de la Vialidad, Ministerio de Transporte y Obras Públicas), establece una serie de requisitos técnicos para el uso de materiales granulares en las capas estructurales de pavimentos flexibles. Estas especificaciones buscan asegurar un comportamiento mecánico adecuado, durabilidad y eficiencia estructural a lo largo de la vida útil del pavimento.

Entre los parámetros exigidos se encuentran los límites granulométricos, los valores mínimos de soporte del ensayo CBR, la resistencia al desgaste, el índice de plasticidad y la densidad seca máxima alcanzable en condiciones de compactación óptima. Por ejemplo, la norma establece que los materiales utilizados en la capa de base deben tener un CBR mínimo del 80% mientras que, para la subbase, el mínimo requerido es del 30%. Además, se especifica que ambos materiales deben cumplir con límites de plasticidad adecuados (índice de plasticidad ≤ 6 para bases y ≤ 12 para subbases) considerando que la subbase puede contener materiales de calidad inferior a los de la base. En cuanto a la subrasante, aunque no se establecen valores únicos debido a su variabilidad, se sugiere un índice de plasticidad menor a 35 (Ministerio de Transporte y Obras Públicas del Ecuador, 2012), especialmente en diseños para tráfico medio o alto, con el fin de reducir la susceptibilidad de agua y mejorar la estabilidad volumétrica del sistema estructural. También se deben cumplir requisitos de resistencia al desgaste como el ensayo de Los Ángeles, en ciertos casos.

Adicionalmente, la norma regula la granulometría del material para cada capa, definiendo porcentajes máximos permitidos de finos, arenas y agregados gruesos. Esto garantiza un adecuado intertrabado de partículas y una compactibilidad eficiente, evitando la pérdida de soporte estructural con el paso del tiempo. Durante la temporada de invierno, es fundamental que el intertrabado y compactibilidad se hayan ejecutado correctamente, ya que es cuando más se deteriora la estructura por efecto de las microfiltraciones (Ministerio de Transporte y Obras Públicas del Ecuador, 2012).

El cumplimiento de estos requisitos es indispensable durante la etapa de diseño y construcción de carreteras en Ecuador, ya que asegura que las capas granulares funcionen correctamente bajo las condiciones de carga y clima previstas en el proyecto.

2.2. Ensayo CBR (California Bearing Ratio)

El ensayo CBR (California Bearing Ratio) es una prueba de laboratorio utilizada para determinar la capacidad de soporte de materiales granulares y suelos subrasante, principalmente utilizada en pruebas de campo como construcciones de obra civil. Fue desarrollado por el Departamento de Transporte del Estado de California en los años 1930 y se ha convertido en un procedimiento estándar en el diseño de pavimentos rígidos o flexibles, en varios países alrededor del mundo, incluido Ecuador (ASTM International, 2020; Ministerio de Transporte y Obras Públicas del Ecuador [MTOP], 2012).

El ensayo CBR sirve para medir la presión necesaria para hacer penetrar el pistón de cilindro metálico de área estándar sobre una muestra compactada de suelo o material granular, en condiciones controladas de humedad y densidad. Dicha presión que se aplica al suelo se compara con un valor de referencia obtenido a partir de un material triturado de alta calidad (piedra

triturada), y el resultado de esta comparación se la expresa como un porcentaje (ASTM International, 2020).

El procedimiento del ensayo CBR puede realizarse en laboratorio o en campo (CBR in situ), y puede desarrollarse bajo condiciones de suelo no saturado o con humedad, lo cual simula el comportamiento del material bajo condiciones saturadas. Los valores típicos del ensayo CBR varían considerablemente según el tipo de material y su preparación. Por ejemplo, suelos cohesivos blandos pueden presentar valores inferiores al 5%, mientras que materiales granulares bien gradados y compactados pueden superar el 80% (Braja M. Das, 2011).

El valor de CBR sirve como un indicador directo de la calidad del material y utilidad para formar parte de una capa estructural en el pavimento. Su uso está incorporado en metodologías de diseño ampliamente aceptadas, como la AASHTO 93 y la NEVI-MTOP, normativas utilizadas en Ecuador, las cuales relacionan el CBR con el espesor requerido de cada capa (AASHTO, 1993; MTOP, 2012).

2.2.1. Aplicación en el diseño estructural (MTOP / AASHTO 93)

El valor obtenido del ensayo CBR cumple un rol de vital importancia en el diseño estructural de pavimentos flexibles, ya que permite estimar la capacidad de soporte de las capas de subbase y base, y definir los espesores necesarios para garantizar una vida útil adecuada frente al tránsito proyectado (MTOP, 2012).

En el caso ecuatoriano, la NEVI 12 – MTOP adopta el CBR como uno de los parámetros fundamentales para establecer el tipo de espesor de las capas de subbase y base, dependiendo del tipo de vía, del tránsito proyectado (número de ejes equivalente) y de las condiciones del suelo de cimentación. La normativa define el espesor mínimo requerido para cada capa en función del valor de CBR obtenido en laboratorio, tanto para materiales naturales como para materiales de relleno.

Por otro lado, el método AASHTO 93, utilizado a nivel internacional, también utiliza el valor del CBR como uno de los parámetros principales para clasificar la calidad del suelo de subrasante (AASHTO, 1993). En este método, el CBR se relaciona con el módulo resiliente (M_r) del material mediante la siguiente ecuación:

$$M_r = 1500 \times CBR \quad (1)$$

Esta expresión, atribuida a Heukelom y Klomp (1962), permite convertir el valor de CBR en un módulo de elasticidad aproximado, lo cual es útil para utilizar en modelos avanzados de diseño estructural de pavimentos que no se basan únicamente en curvas empíricas como la AASHTO 93 o la NEVI - MTOP.

En ambos enfoques, el CBR actúa como la unión entre el comportamiento mecánico presente del suelo o material granular y su capacidad para cumplir una función estructural específica dentro del pavimento. Por ello, una estimación confiable de este valor es fundamental para lograr diseños eficientes, seguros y económicamente viables (López & García, 2015; MTOP, 2012).

2.3. Módulo de Young en materiales granulares

El Módulo de Young (E), también conocido como módulo de elasticidad, es una propiedad mecánica que describe la rigidez de un material frente a la deformación elástica bajo la acción de una carga. En el contexto de aplicarlo en pavimentos, este parámetro representa la capacidad de una capa subbase o base para resistir deformaciones cuando está sometida a esfuerzos verticales repetitivos, como los generados por los ejes que atraviesan la capa de rodadura de la estructura (Braja M. Das, 2011).

En material granular sin estabilizar, el Módulo de Young no es constante, ya que depende de diversos factores como la densidad, la compactación, el contenido de humedad, la distribución

de partículas y las condiciones de confinamiento. Por ello, en algunos casos se utiliza el módulo resiliente (M_r) como una forma más representativa del comportamiento bajo cargas repetitivas; sin embargo, para propósitos de estimación y correlación, se emplea comúnmente el Módulo de Young estático, obtenido mediante ensayos específicos (ASTM, 2020).

La determinación del Módulo de Young en campo o laboratorio permite complementar la caracterización del material granular más allá del resultado obtenido con el ensayo CBR. Este parámetro resulta especialmente útil cuando se pretende aplicar modelos de diseño donde se calculen esfuerzos, deformaciones y deflexiones, y se ajusten al comportamiento real observado en campo (deterioro, fallas, vida útil) donde es necesario definir las propiedades elásticas de cada capa del pavimento para simular el comportamiento del sistema frente a cargas reales (López & García, 2015).

La correlación entre el Módulo de Young y el CBR ha sido objeto de múltiples investigaciones, en las cuales se busca establecer una relación funcional que permita estimar uno a partir del otro. Esto resulta valioso en contextos donde no es posible ejecutar todos los ensayos y se requiere optimizar recursos sin comprometer la calidad del diseño estimando la vida útil y la seguridad vial que va a proveer la estructura (Alvarado, 2019; Meneses, 2023).

2.3.1. Obtención mediante GeoGauge

El GeoGauge es un equipo portátil utilizado para determinar en campo el módulo de rigidez superficial de materiales compactados como el suelo y capas granulares. Su función se basa en la aplicación de una carga dinámica oscilatoria sobre la superficie del material mediante una base circular que induce deformaciones controladas, estas deformaciones son medidas por sensores permitiendo calcular el módulo de deformación estática, el cual puede asociarse al Módulo de Young (E) (ASTM International, 2020).

El equipo opera generalmente en un rango de frecuencias de 100 a 196 Hz y proporciona resultados casi inmediatos, lo que lo convierte en una herramienta útil para verificar la calidad de la compactación durante la ejecución de obras viales. A diferencia de otros ensayos que requieren extracción de muestras o montajes complejos, el GeoGauge permite realizar mediciones in situ. Sin necesidad de alteraciones en el perfil estructural del pavimento en construcción (Pazmiño, 2019).

Los valores obtenidos mediante el GeoGauge pueden variar en función de las condiciones del suelo, el contenido de humedad, la homogeneidad del material y el confinamiento lateral. Por ello, se recomienda realizar varias mediciones en diferentes puntos de una misma sección y calcular un promedio representativo (Maila, 2022).

En estudios recientes realizados en Ecuador, el GeoGauge ha sido empleado como herramienta alternativa para obtener el módulo de rigidez superficial de materiales granulares, a través de ese valor estimar su relación con el ensayo CBR, buscando establecer correlaciones que sirvan de apoyo al diseño estructural de pavimentos flexibles (Alvear, 2019; Holguín, 2020).

CAPÍTULO III

3. METODOLOGÍA

3.1. Tipo y enfoque de investigación

Esta investigación tiene un enfoque cuantitativo, ya que se basa en el análisis numérico de datos obtenidos, a través de ensayos de laboratorio, y se busca establecer relaciones estadísticas entre dos variables, el índice CBR y el Módulo de Young, ambas siendo claves con el énfasis del comportamiento de materiales granulares.

El presente trabajo de investigación es de carácter aplicada, tiene como objetivo generar una herramienta técnica que pueda ser utilizada como insumo en el diseño estructural de pavimentos flexibles, no se interviene de forma directa sobre las condiciones de los materiales, ni se manipulan las variables mediante la experimentación, por lo que el diseño corresponde a una investigación no experimental.

La metodología empleada es de carácter descriptivo y correlacional. Se describen de forma estadística las propiedades mecánicas de los materiales provenientes de las 18 minas del Ecuador, mientras que, por otro lado, se busca determinar el grado de correlación funcional entre ambas variables (CBR y Módulo de Young).

3.2. Fuente y recopilación de datos

Los datos utilizados en esta investigación fueron recolectados a partir de trabajos de titulación previos realizados en la Pontificia Universidad Católica del Ecuador (PUCE), enfocados en la caracterización geotécnica de materiales granulares provenientes de distintas minas del país, estos trabajos incluyeron resultados de ensayos de laboratorio como el CBR (California Bearing Ratio) y el Módulo de Young para efectos del presente análisis.

La recopilación se realizó de manera documentada, extrayendo únicamente los datos cuantitativos reportados en las fichas técnicas de cada mina, se recopilaron todos los resultados correspondientes a las 18 minas distribuidas en distintas provincias y regiones del Ecuador, aportando diversidad geográfica a la base de datos.

La información fue organizada en una hoja de cálculo de Excel, donde se clasificó todos los datos de la siguiente manera:

- Nombre de la mina
- Tipo de material
- Capa a la que pertenece
- Valores obtenidos de CBR
- Valores obtenidos de Módulo de Young

Esta estructuración permitió la generación de una base de datos unificada y sencilla, en la cual se aplicó varios tipos de análisis estadísticos descriptivos y correlacionales que sustentan los resultados de esta tesis.

3.3. Selección y clasificación de materiales

Para el desarrollo de este estudio, se seleccionaron los materiales granulares evaluados en ensayos de laboratorio pertenecientes a 18 minas del Ecuador, cuyos datos fueron recopilados a partir de trabajos de titulación realizados en la PUCE. Esta selección se basó, en la disponibilidad de tesis en el repositorio de la universidad, en el criterio de cada conjunto de datos que incluyera al menos un valor de índice CBR y su correspondiente módulo de rigidez superficial, cuya condición es indispensable para poder aplicar los análisis de correlación propuestos.

Una vez obtenida la información, los materiales fueron clasificados de acuerdo con el tipo de capa a la que pertenecen, diferenciándose cada una de la siguiente forma:

- Las capas de base son subdivididas en: Base Clase 1, Base Clase 2, Base Clase 3 y Base Clase 4.
- Las capas de subbase son subdivididas en: Subbase Clase 1, Subbase Clase 2 y Subbase Clase 3.

Esta clasificación permitió organizar la base de datos de forma estructurada y homogénea, facilitando su análisis estadístico. Para que permitiese identificar las capas más representativas y con mayor número de muestras, lo cual sirvió de base para el análisis por tipo de capa.

Todos los trabajos contenían el mismo número de capas y resultados, donde se ha extraído el mayor valor del CBR (0.2) y el promedio del Módulo de Young de cada uno, basado en la disponibilidad y coherencia de los datos reportados. Por lo tanto, el detalle de las minas, sus capas evaluadas y valores obtenidos que se presentan en las siguientes tablas.

Tabla 1.

Resultados de CBR y Módulo de Young para las clases de material de la Cantera San Joaquín (Santa Rita).

No.	Mina	Material	CBR 0.2 (%)	Módulo Young (MPa)
		BASE CLASE 1	37,30	104,92
		BASE CLASE 2	37,25	104,66
	CANTERA	BASE CLASE 3	36,70	103,29
1	SAN	BASE CLASE 4	34,20	98,42
	JOAQUIN	SUBBASE CLASE 1	34,20	97,45
		SUBBASE CLASE 2	33,18	95,82
		SUBBASE CLASE 3	29,10	90,43

Nota. Elaboración propia con datos de Urquizo (2019).

Tabla 2.

Resultados de CBR y Módulo de Young para las clases de material de la Mina Compañía JHV (Tena).

No.	Mina	Material	CBR 0.2 (%)	Módulo Young (MPa)
		BASE CLASE 1	32,00	72,29
		BASE CLASE 2	33,17	73,15
	MINA	BASE CLASE 3	27,50	71,80
2	COMPAÑÍA	BASE CLASE 4	33,33	73,71
	JHV	SUBBASE CLASE 1	45,33	75,49
		SUBBASE CLASE 2	31,33	71,96
		SUBBASE CLASE 3	31,67	72,86

Nota. Elaboración propia con datos de Pazmiño (2019).

Tabla 3.

Resultados de CBR y Módulo de Young para las clases de material de la Mina Doña Meche (Esmeraldas).

No.	Mina	Material	CBR 0.2 (%)	Módulo Young (MPa)
		BASE CLASE 1	70.20	50.27
		BASE CLASE 2	79.00	78.39
	MINA	BASE CLASE 3	66.50	57.17
3	DOÑA	BASE CLASE 4	63.50	59.86
	MECHE	SUBBASE CLASE 1	76.10	70.76
		SUBBASE CLASE 2	75.00	62.16

	SUBBASE CLASE 3	58.40	34.65
--	-----------------	-------	-------

Nota. Elaboración propia con datos de Meneses (2023).

Tabla 4.

Resultados de CBR y Módulo de Young para las clases de material de la Mina La China (Quevedo).

No.	Mina	Material	CBR 0.2 (%)	Módulo Young (MPa)
		BASE CLASE 1	26.95	102.99
		BASE CLASE 2	37.50	100.46
	MINA	BASE CLASE 3	26.60	103.89
4	LA	BASE CLASE 4	33.75	104.45
	CHINA	SUBBASE CLASE 1	30.50	71.15
		SUBBASE CLASE 2	32.50	72.49
		SUBBASE CLASE 3	29.35	70.82

Nota. Elaboración propia con datos de Zambrano (2019).

Tabla 5.

Resultados de CBR y Módulo de Young para las clases de material de la Mina de Macas (Macas).

No.	Mina	Material	CBR 0.2 (%)	Módulo Young (MPa)
	MINA	BASE CLASE 1	73.00	124.55
5	DE	BASE CLASE 2	68.00	118.19
	MACAS	BASE CLASE 3	68.00	124.55

	BASE CLASE 4	76.00	119.47
	SUBBASE CLASE 1	54.00	98.67
	SUBBASE CLASE 2	65.00	101.38
	SUBBASE CLASE 3	45.00	97.34

Nota. Elaboración propia con datos de Cox & Gómez (2019).

Tabla 6.

Resultados de CBR y Módulo de Young para las clases de material de la Mina del Coca (Coca).

No.	Mina	Material	CBR 0.2 (%)	Módulo Young (MPa)
		BASE CLASE 1	51.00	118.53
		BASE CLASE 2	52.00	113.38
	MINA	BASE CLASE 3	52.00	115.52
6	DEL	BASE CLASE 4	52.00	115.79
	COCA	SUBBASE CLASE 1	58.00	107.96
		SUBBASE CLASE 2	50.00	106.64
		SUBBASE CLASE 3	47.00	103.16

Nota. Elaboración propia con datos de Cox & Gómez (2019).

Tabla 7.

Resultados de CBR y Módulo de Young para las clases de material de la Mina Materiales Pétreos R/R (Cantera Ramírez).

No.	Mina	Material	CBR 0.2 (%)	Módulo Young (MPa)
7		BASE CLASE 1	48.20	101.68

		BASE CLASE 2	49.30	101.68
		BASE CLASE 3	46.50	100.81
	MINA	BASE CLASE 4	45.80	95.14
	MATERIALES	SUBBASE CLASE 1	40.10	94.77
	PÉTREOS R/R	SUBBASE CLASE 2	42.30	93.33
		SUBBASE CLASE 3	45.00	87.50

Nota. Elaboración propia con datos de Tafur (2020).

Tabla 8.

Resultados de CBR y Módulo de Young para las clases de material de la Mina Mulaló (Cotopaxi)

No.	Mina	Material	CBR 0.2 (%)	Módulo Young (MPa)
		BASE CLASE 1	76.00	121.87
		BASE CLASE 2	93.00	124.97
	MINA	BASE CLASE 3	47.00	100.34
8	MULALÓ	BASE CLASE 4	91.00	123.53
		SUBBASE CLASE 1	70.00	90.37
		SUBBASE CLASE 2	76.00	88.11
		SUBBASE CLASE 3	83.00	92.74

Nota. Elaboración propia con datos de Alvarado (2019).

Tabla 9.*Resultados de CBR y Módulo de Young para las clases de material de la Mina Picoazá**(Portoviejo).*

No.	Mina	Material	CBR 0.2 (%)	Módulo Young (MPa)
		BASE CLASE 1	84.00	112.66
		BASE CLASE 2	77.10	115.34
		BASE CLASE 3	72.90	118.38
9	MINA PICOAZÁ	BASE CLASE 4	92.70	126.09
		SUBBASE CLASE 1	80.00	96.36
		SUBBASE CLASE 2	78.10	98.25
		SUBBASE CLASE 3	78.00	99.69

Nota. Elaboración propia con datos de Ríos (2019).**Tabla 10.***Resultados de CBR y Módulo de Young para las clases de material de la Mina Punto Azul**(Ibarra).*

No.	Mina	Material	CBR 0.2 (%)	Módulo Young (MPa)
		BASE CLASE 1	88.00	132.63
	MINA	BASE CLASE 2	84.45	128.58
10	PUNTO	BASE CLASE 3	78.40	125.88
	AZUL	BASE CLASE 4	74.30	124.69
		SUBBASE CLASE 1	69.70	122.65

SUBBASE CLASE 2	68.90	120.84
SUBBASE CLASE 3	64.50	115.73

Nota. Elaboración propia con datos de Coronel (2019).

Tabla 11.

Resultados de CBR y Módulo de Young para las clases de material de la Mina San Luis Cananvalle (Tabacundo).

No.	Mina	Material	CBR 0.2 (%)	Módulo Young (MPa)
		BASE CLASE 1	44.80	96.23
		BASE CLASE 2	40.10	93.61
	MINA SAN	BASE CLASE 3	39.50	95.89
11	LUIS	BASE CLASE 4	38.90	94.37
	CANANVALLE	SUBBASE CLASE 1	36.50	66.02
		SUBBASE CLASE 2	36.20	67.27
		SUBBASE CLASE 3	35.20	65.67

Nota. Elaboración propia con datos de Alvear (2019).

Tabla 12.

Resultados de CBR y Módulo de Young para las clases de material de la Mina Segundo (Latacunga).

No.	Mina	Material	CBR 0.2 (%)	Módulo Young (MPa)
	MINA	BASE CLASE 1	79.00	119.84
12	SEGUNDO	BASE CLASE 2	93.00	128.43

	BASE CLASE 3	76.00	119.33
	BASE CLASE 4	89.00	126.11
	SUBBASE CLASE 1	74.00	113.91
	SUBBASE CLASE 2	80.00	120.29
	SUBBASE CLASE 3	82.00	122.72

Nota. Elaboración propia con datos de Maila (2022).

Tabla 13.

Resultados de CBR y Módulo de Young para las clases de material de la Mina Vargas Soria (Baños).

No.	Mina	Material	CBR 0.2 (%)	Módulo Young (MPa)
		BASE CLASE 1	70.00	91.77
		BASE CLASE 2	50.00	91.10
	MINA	BASE CLASE 3	73.00	91.35
13	VARGAS	BASE CLASE 4	97.00	89.86
	SORIA	SUBBASE CLASE 1	78.00	72.27
		SUBBASE CLASE 2	98.00	75.05
		SUBBASE CLASE 3	75.00	71.65

Nota. Elaboración propia con datos de Vaca (2019).

Tabla 14.

Resultados de CBR y Módulo de Young para las clases de material de la Mina Wiliselzu CIA.

LTDA. (Puyo).

No.	Mina	Material	CBR 0.2 (%)	Módulo Young (MPa)
		BASE CLASE 1	78.00	112.08
		BASE CLASE 2	75.00	113.55
	MINA	BASE CLASE 3	78.00	116.93
14	WILISELZU	BASE CLASE 4	78.00	115.82
	CIA. LTDA.	SUBBASE CLASE 1	74.00	50.58
		SUBBASE CLASE 2	74.00	66.17
		SUBBASE CLASE 3	77.00	68.44

Nota. Elaboración propia con datos de Ocaña (2019).

Tabla 15.

Resultados de CBR y Módulo de Young para las clases de material de la Mina La Chimba

(Cayambe).

No.	Mina	Material	CBR 0.2 (%)	Módulo Young (MPa)
		BASE CLASE 1	74.75	114.68
	MINA	BASE CLASE 2	84.00	117.96
15	LA	BASE CLASE 3	87.50	121.39
	CHIMBA	BASE CLASE 4	80.00	130.88
		SUBBASE CLASE 1	86.00	98.64

	SUBBASE CLASE 2	69.50	100.50
	SUBBASE CLASE 3	77.00	102.36

Nota. Elaboración propia con datos de Echeverría & Bastidas (2019).

Tabla 16.

Resultados de CBR y Módulo de Young para las clases de material de la Mina Loma de Cuniburo (Cayambe).

No.	Mina	Material	CBR 0.2 (%)	Módulo Young (MPa)
		BASE CLASE 1	75.00	115.07
		BASE CLASE 2	97.00	116.96
	MINA	BASE CLASE 3	92.00	122.36
16	LOMA DE	BASE CLASE 4	86.00	134.55
	CUNIBURO	SUBBASE CLASE 1	86.00	96.64
		SUBBASE CLASE 2	75.00	97.80
		SUBBASE CLASE 3	69.00	99.98

Nota. Elaboración propia con datos de Echeverría & Bastidas (2019).

Tabla 17.

Resultados de CBR y Módulo de Young para las clases de material de la Mina Malca 3 (Catamayo).

No.	Mina	Material	CBR 0.2 (%)	Módulo Young (MPa)
17		BASE CLASE 1	35.33	88.42
		BASE CLASE 2	25.00	72.62

		BASE CLASE 3	31.00	77.83
	MINA	BASE CLASE 4	34.33	86.17
	MALCA	SUBBASE CLASE 1	28.00	66.84
	3	SUBBASE CLASE 2	28.33	66.63
		SUBBASE CLASE 3	26.00	64.49

Nota. Elaboración propia con datos de Palacios & Pachi (2019).

Tabla 18.

Resultados de CBR y Módulo de Young para las clases de material de la Mina Malca 4 (Catamayo).

No.	Mina	Material	CBR 0.2 (%)	Módulo Young (MPa)
		BASE CLASE 1	37.00	88.71
		BASE CLASE 2	39.00	97.08
	MINA	BASE CLASE 3	41.33	100.12
18	MALCA	BASE CLASE 4	33.67	84.28
	4	SUBBASE CLASE 1	32.67	69.93
		SUBBASE CLASE 2	36.33	69.75
		SUBBASE CLASE 3	35.33	69.76

Nota. Elaboración propia con datos de Palacios & Pachi (2019).

3.4. Variable a estudiar

El presente estudio se basa en el análisis de dos variables cuantitativas que representan propiedades dentro de los materiales granulares utilizados en estructuras, en este caso de estudio de pavimentos flexibles, de las cuales se ha clasificado en:

Variable dependiente:

- Es el índice de CBR (California Bearing Ratio), el cual representa la capacidad de soporte del material, es expresado en porcentaje y se obtiene mediante ensayo de penetración en laboratorio.

Variable independiente:

- Es el Módulo de Young, el cual representa la rigidez del material frente a deformaciones elásticas, es expresado en MPa y se obtuvo a partir de lecturas con GeoGauge.

Se considera una variable que sirva para clasificar y segmentar los análisis al tipo de capa estructural clasificada como:

- Base Clase 3.
- Subbase Clase 3.

Estas variables fueron seleccionadas por su relevancia en el diseño estructural de pavimentos y porque permiten realizar tanto análisis estadísticos descriptivos, como modelos de correlación funcional. La identificación de estas variables también ayuda con la interpretación de resultados aplicables al contexto ecuatoriano.

3.5. Técnicas estadísticas aplicadas

Para cumplir con los objetivos del presente trabajo, se aplicaron varios métodos estadísticos utilizando herramientas de Excel, lo que permitió permitieron describir el comportamiento de los datos recopilados y así poder establecer relaciones funcionales entre el índice CBR y el Módulo de Young. Las ecuaciones fueron utilizadas a través de funciones preestablecidas en el software de Microsoft Excel, estas ecuaciones se organizan en los métodos que son cinco bloques principales:

3.5.1. Estadística descriptiva

Se aplicaron medidas de tendencia central y dispersión para analizar el comportamiento individual de las variables CBR y Módulo de Young, de forma parcial de acuerdo con su tipo de capa de base o capa de subbase, asimismo de forma general, abarcando todas las capas de las minas. Las medidas utilizadas fueron:

- Media (\bar{x}): permite calcular el valor promedio de un conjunto de datos. En Excel se obtiene con la función =PROMEDIO(rango)

$$x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (2)$$

- Mediana (Me): es el valor central que divide la suma de toda la muestra ordenada en dos partes iguales, si n es impar, corresponde al dato central, o si el promedio de los datos n es par, corresponde a los dos valores centrales. En Excel se obtiene con la función =MEDIANA(número 1, [número 2], ...).
- Moda (Mo): es el valor que se repite con mayor frecuencia en el conjunto de datos. En Excel se obtiene con la función =MODA(número 1, [número 2], ...).
- Rango (R): es el conjunto de datos donde se diferencia entre el máximo y el mínimo valor. En Excel se obtiene con la función =MAX(rango) – MIN(rango)

$$R = x_{máx} - x_{mín} \quad (3)$$

- Rango intercuartil (IQR): es el conjunto de datos donde se diferencia entre el tercer y primer cuartil, mostrando la dispersión de la mitad de los datos. En Excel se obtiene con la función =CUARTIL.INCL(rango, 3) - CUARTIL.INCL(rango, 1)

$$IQR = Q_3 - Q_1 \quad (4)$$

- Varianza (muestral) (s^2): es la medida de la dispersión total de los datos con respecto a la media antes calculada. En Excel se obtiene con la función =VAR.S(rango)

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (5)$$

- Desviación estándar (s): es el cálculo de la raíz cuadrada de la varianza, donde indica que tanto se alejan los valores con respecto a la media. En Excel se obtiene con la función =DESVEST.INCL(rango, 1)

$$s = \sqrt{s^2} \quad (6)$$

Estos valores obtenidos de estas ecuaciones permitieron conocer la distribución, dispersión y acumulación de los datos para cada variable en estudio.

3.5.2. Distribuciones de frecuencia

Se elaboraron tablas de frecuencias para cada tipo de capa, organizando los valores de CBR y Módulo de Young en intervalos de clase, para así poder realizar los cálculos de frecuencia siguientes:

- Frecuencia absoluta (f): es el número de observaciones en un intervalo determinado.
- Frecuencia relativa (fr): es la proporción total que representa cada intervalo.

$$fr = \frac{f}{1} \quad (7)$$

- Frecuencia acumulada (FR): es la suma de las frecuencias relativas.

$$FR = \sum_{i=1}^k fr_i \quad (8)$$

Para el cálculo de las frecuencias en Excel se utilizó la función =FRECUENCIA(rango_de_datos, rango_de_intervalos), donde:

A raíz de estos datos obtenidos, se ejecutaron histogramas para visualizar la distribución de valores por cada capa y de forma general, es decir, con todas las capas.

3.5.3. Correlación y regresión

Se hizo el análisis de correlación lineal para identificar el grado de semejanza entre el CBR y el Módulo de Young, donde se calcularon los coeficientes siguientes:

- Coeficiente de correlación de Pearson (r): permite medir el grado de relación lineal entre dos variables, variando entre -1 y $+1$.

$$r = \frac{n \sum xy - \sum x \sum y}{\sqrt{(n \sum x^2 - (\sum x)^2)(n \sum y^2 - (\sum y)^2)}} \quad (9)$$

- Coeficiente de determinación (R^2): calcula el porcentaje de variación que puede haber en una variable sobre otra. En Excel se obtiene con la función =CORREL(matriz 1; matriz 2)

$$R^2 = r^2 \quad (10)$$

Luego se continuó con los modelos de regresión lineal simple para estimar el CBR en función del Módulo de Young de acuerdo con el tipo de capa y de todas sus capas. Para así poder realizar las gráficas de las líneas de tendencia correspondientes y las ecuaciones resultantes para cada una de ellas. Mediante la función lineal de la forma:

$$y = a \times x + b \quad (11)$$

Donde:

y = variable dependiente

x = variable independiente

a = pendiente de la recta

b = ordenada al origen

En Excel se utilizó el análisis de gráficos de dispersión con la línea de tendencia lineal.

3.5.4. Cálculo de error porcentual y estimaciones

Con las ecuaciones de regresión obtenidas se realizó una estimación de todos los valores de CBR (base y subbase) y se compararon con los valores reales de cada mina. A partir estos resultados, se calculó el error porcentual con la siguiente ecuación:

$$Error \% = \frac{CBR_{estimado} - CBR_{real}}{CBR_{real}} \times 100 \quad (12)$$

Para que el análisis para cada uno de los métodos estadísticos empleados permita evaluar el nivel de ajuste del modelo propuesto.

3.5.5. Representación gráfica

Se utilizaron herramientas gráficas para facilitar la interpretación visual de los resultados, como:

- Histogramas por capa
- Histogramas generales
- Gráficos de dispersión
- Gráficos de comparación entre CBR real y estimado
- Líneas de tendencia con su respectiva ecuación y coeficiente R^2

Los histogramas permitieron visualizar la frecuencia de los valores de acuerdo con su intervalo de CBR y Módulo de Young. Mientras que el gráfico de dispersión mostró la relación funcional entre cada base y subbase para evaluar la correlación entre las variables. Por último, los gráficos comparativos de CBR real y el CBR estimado ayudo a verificar la precisión del modelo de regresión lineal.

Estos gráficos fueron hechos en Microsoft Excel con las herramientas de gráficos, de acuerdo con el tipo de capa y el tipo de grafico adecuado para cada caso. Asimismo, se ejecutó la opción de mostrar la tendencia lineal y el coeficiente R^2 .

CAPÍTULO IV

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1. Estadística descriptiva por tipo de capa y global

En esta sección se presentan los resultados del análisis estadístico descriptivo aplicado a los valores del índice CBR y Módulo de Young, utilizando los datos obtenidos de las capas de base y subbase de las 18 minas analizadas, estos resultados se organizaron por tipo de capa y de forma general, permitiendo comparaciones específicas de los materiales para el diseño de pavimento flexible. Los valores específicos de cada dato estadístico obtenido para las capas analizadas se presentan a lo largo del presente capítulo.

4.1.1. Media

Los resultados de la media para la Base Clase 3 y la Subbase Clase 3 reflejan comportamientos estructurales diferenciados, coherentes con su ubicación dentro del sistema de pavimento flexible.

En la Base Clase 3, se obtuvo un CBR promedio de 57.80% y un Módulo de Young medio de 103.71 MPa. Estos valores indican una buena capacidad de soporte y rigidez, ligeramente por debajo de los valores máximos reportados en otras clases de base, como la Clase 4. No obstante, estos niveles de desempeño mecánico son adecuados para cumplir con la función estructural intermedia que desempeñan las bases, sobre todo en estructuras sometidas a cargas medianamente exigentes.

Por su parte, la Subbase Clase 3 registró un CBR promedio de 54.86% y un Módulo de Young de 85.00 MPa, valores inferiores a los observados en las capas base, pero aún adecuados para el propósito de transferencia de cargas y estabilización de la subrasante. El menor módulo de rigidez es esperable debido al uso de materiales de menor calidad, pero el valor de CBR se

encuentra relativamente cercano al de la Base Clase 3, lo que podría deberse a la calidad de algunas muestras individuales o a una buena compactación en ciertos tramos.

Estos promedios, comparados con el resto de las capas, permiten evidenciar que la Base Clase 3 mantiene un rendimiento estructural aceptable y que la Subbase Clase 3, aunque más variable, cumple una función eficaz de soporte, siempre que se mantengan controles adecuados en su proceso constructivo.

Tabla 19.

Media general de CBR y Módulo de Young en materiales granulares de las minas estudiadas.

Material	CBR	MÓDULO DE YOUNG
BASE CLASE 1	60.03	103.84
BASE CLASE 2	61.88	105.01
BASE CLASE 3	57.80	103.71
BASE CLASE 4	62.97	105.73
SUBBASE CLASE 1	58.51	86.69
SUBBASE CLASE 2	58.32	87.47
SUBBASE CLASE 3	54.86	85.00

4.1.2. Mediana

Los valores de la mediana permiten analizar el comportamiento central del conjunto de datos sin que se vean afectados por valores extremos. En este caso, tanto la Base Clase 3 como la Subbase Clase 3 presentan diferencias notables en sus propiedades mecánicas, lo cual es coherente con su función estructural dentro del pavimento flexible.

Para la Base Clase 3, se obtuvo una mediana de CBR de 59.25% y un Módulo de Young de 103.59 MPa, cifras que se alinean estrechamente con los promedios generales, lo que sugiere que los datos no presentan grandes asimetrías ni valores atípicos relevantes. Estos valores indican un comportamiento estructural confiable dentro de su categoría, manteniéndose por debajo de las clases superiores como Base Clase 4, pero dentro de rangos adecuados para cumplir su función de soporte intermedio.

En el caso de la Subbase Clase 3, la mediana del CBR fue de 52.70% y el Módulo de Young fue de 88.96 MPa. Estos valores son menores en comparación con los de la base, lo cual es esperable debido a la calidad inferior del material utilizado en esta capa. Aun así, los resultados reflejan un desempeño razonable y estable, lo que permite afirmar que los materiales utilizados en esta clase pueden cumplir adecuadamente su función de transición y distribución de cargas hacia la subrasante, siempre y cuando se mantengan condiciones óptimas de compactación y humedad.

En conjunto, los valores de la mediana refuerzan lo observado en los promedios: la Base Clase 3 tiene mejor desempeño mecánico que la Subbase Clase 3, lo que valida la lógica estructural aplicada en la clasificación y uso de estos materiales.

Tabla 20.

Mediana general de CBR y Módulo de Young en materiales granulares de las minas estudiadas.

Material	CBR	MÓDULO DE YOUNG
BASE CLASE 1	70.10	108.50
BASE CLASE 2	60.00	109.02
BASE CLASE 3	59.25	103.59
BASE CLASE 4	68.90	110.12

SUBBASE CLASE 1	63.85	92.57
SUBBASE CLASE 2	66.95	90.72
SUBBASE CLASE 3	52.70	88.96

4.1.3. Moda

Pese a ser considerada en este estudio, su utilidad fue limitada porque los conjuntos de datos no presentaron valores repetidos, lo que puede significar una alta dispersión típica en muestras de materiales naturales, por consiguiente, la moda no aportó información en el análisis estadístico de los materiales.

4.1.4. Varianza

La varianza es una medida que refleja cuánta dispersión existe entre los valores de un conjunto de datos respecto a su media. A mayor varianza, mayor es la dispersión de los datos; y por ende, menor consistencia en el comportamiento del material.

Para la Base Clase 3, se obtuvo una varianza del CBR de 458.43 y una varianza del Módulo de Young de 380.03. Estos valores indican una dispersión moderada-alta, lo cual es coherente con el hecho de que los materiales granulares sin tratamiento presentan variabilidad natural. Esta variabilidad puede deberse a diferencias en la granulometría, compactación o contenido de humedad entre los ensayos de las distintas minas. No obstante, al comparar con otras clases de base, la Clase 3 se mantiene dentro de un rango razonable, lo que sugiere que su comportamiento, aunque variable, sigue siendo estructuralmente aceptable.

En cuanto a la Subbase Clase 3, se reporta una varianza del CBR de 439.09 y del Módulo de Young de 473.46, esta última siendo una de las más altas entre todos los grupos analizados. Este comportamiento evidencia una mayor dispersión en la rigidez de los materiales usados en esta

clase, posiblemente atribuible a la menor exigencia técnica en subbases, donde es más común el uso de materiales heterogéneos. Aunque funcionales, estos materiales requieren mayor control para garantizar uniformidad estructural en proyectos viales.

En conjunto, ambos materiales muestran una dispersión significativa, pero coherente con su naturaleza no tratada. La Base Clase 3 presenta menor dispersión en rigidez respecto a la Subbase Clase 3, lo que refuerza su papel estructural superior dentro del pavimento flexible. Este análisis permite comprender mejor la necesidad de procesos adecuados de selección y control de calidad, especialmente en capas inferiores donde la variabilidad puede comprometer la eficiencia del diseño estructural.

Tabla 21.

Varianza general de CBR y Módulo de Young en materiales granulares de las minas estudiadas.

Material	CBR	MÓDULO DE YOUNG
BASE CLASE 1	417.47	410.98
BASE CLASE 2	569.63	319.28
BASE CLASE 3	458.43	380.03
BASE CLASE 4	593.13	463.67
SUBBASE CLASE 1	434.79	376.20
SUBBASE CLASE 2	473.97	359.97
SUBBASE CLASE 3	439.09	473.46

4.1.5. Desviación estándar

La desviación estándar indica cuánto se alejan, en promedio, los valores individuales respecto a la media. A menor valor, más homogéneo y consistente es el conjunto de datos.

Para la Base Clase 3, la desviación estándar del CBR fue de 21.41 y la del Módulo de Young de 19.49. Estos valores representan una dispersión moderada, lo cual reafirma lo observado en la varianza: los materiales de esta clase presentan cierta variabilidad, aunque dentro de un rango controlado. Esta desviación sugiere que, aunque existen diferencias entre muestras, el comportamiento del material es relativamente estable.

En la Subbase Clase 3, la desviación estándar fue de 20.95 para el CBR y 21.76 para el Módulo de Young. A pesar de ser ligeramente mayores, estos valores se mantienen dentro de un rango similar al de la Base Clase 3. Sin embargo, el valor del módulo indica una ligeramente mayor variabilidad en la rigidez del material en esta subbase, lo que puede asociarse a la calidad más heterogénea esperada en capas inferiores del pavimento.

Ambos materiales reflejan desviaciones comparables a las demás clases de su categoría, mostrando que la dispersión observada en los datos es típica en agregados sin tratamiento. Este análisis refuerza la necesidad de un adecuado control de calidad en la etapa de construcción, ya que incluso desviaciones estándar aparentemente pequeñas pueden impactar en la uniformidad estructural del pavimento a largo plazo.

Tabla 22.

Desviación estándar general de CBR y Módulo de Young en materiales granulares de las minas estudiadas.

Material	CBR	MÓDULO DE YOUNG
BASE CLASE 1	20.43	20.27
BASE CLASE 2	23.87	17.87
BASE CLASE 3	21.41	19.49

BASE CLASE 4	24.35	21.53
SUBBASE CLASE 1	20.85	19.40
SUBBASE CLASE 2	21.77	18.97
SUBBASE CLASE 3	20.95	21.76

4.1.6. Rango

En la Tabla 23, se observó que el rango de valores del índice CBR y del Módulo de Young para las clases Base 3 y Subbase 3 indica una amplitud moderada-alta en la dispersión de los datos.

En la Base Clase 3 el rango del CBR fue de 65.40, lo cual refleja una alta variabilidad en la capacidad de soporte de los materiales de esta clase. Esta amplitud puede atribuirse a factores como la heterogeneidad natural de los agregados, variaciones en la humedad de compactación, o condiciones de laboratorio distintas entre las muestras. En cuanto al Módulo de Young, el rango fue de 68.71, valor también elevado, esto significa que, dentro de esta misma clase de base, existen materiales con diferentes niveles de rigidez, lo que puede estar relacionado con diferencias en la compactación, textura del material o tipo de agregado dominante.

Por otro lado, la Subbase Clase 3 el rango del CBR fue de 57.00, una dispersión considerable, aunque ligeramente menor a la de la Base Clase 3, esto indica que el soporte mecánico de las muestras varió notablemente entre minas o condiciones de ensayo. Mientras que, el Módulo de Young presentó un rango de 88.07, el más alto entre todas las clases analizadas, esta alta dispersión de la rigidez podría indicar la presencia de materiales con un comportamiento mecánico muy diverso dentro de esta categoría de subbase, lo cual puede representar un riesgo para el diseño estructural si no se seleccionan adecuadamente los materiales a emplear.

Tabla 23.

Rango general de CBR y Módulo de Young en materiales granulares de las minas estudiadas.

Material	CBR (%)	MÓDULO DE YOUNG
BASE CLASE 1	61.05	82.37
BASE CLASE 2	72.00	55.96
BASE CLASE 3	65.40	68.71
BASE CLASE 4	63.67	74.70
SUBBASE CLASE 1	58.00	72.07
SUBBASE CLASE 2	69.67	58.69
SUBBASE CLASE 3	57.00	88.07

4.1.7. Rango intercuartílico (IQR)

El rango intercuartílico (IQR) permite identificar la dispersión central de los datos, es decir, el rango donde se encuentra el 50% de los valores intermedios, brindando una medida de variabilidad menos sensible a valores atípicos en comparación con el rango o la desviación estándar.

En el caso de la Base Clase 3, el IQR del CBR fue de 35.29, mientras que el del Módulo de Young fue de 22.15. Estos valores sugieren que, a pesar de la variabilidad general observada, los datos centrales presentan una dispersión moderada, lo cual puede indicar una relativa consistencia en la calidad del material para esta clase específica. Sin embargo, la amplitud en el CBR también refleja diferencias funcionales en el soporte dentro del grupo.

Por otro lado, la Subbase Clase 3 presentó un IQR de 41.27 para el CBR y de 29.88 para el Módulo de Young, evidenciando una mayor dispersión central que la Base Clase 3. Esto implica que, incluso en el núcleo de los datos, existe una mayor variabilidad entre las muestras de subbase,

lo que puede atribuirse a la naturaleza más heterogénea de los materiales utilizados o a condiciones menos controladas de compactación.

Ambos resultados refuerzan la necesidad de un criterio riguroso de selección y control de calidad en el uso de materiales granulares, especialmente en etapas de diseño estructural donde se pretende utilizar modelos predictivos de desempeño

Tabla 24.

Rango intercuartílico general de CBR y Módulo de Young en materiales granulares de las minas estudiadas.

Material	CBR (%)	MÓDULO DE YOUNG (MPa)
BASE CLASE 1	36.58	24.78
BASE CLASE 2	43.48	23.23
BASE CLASE 3	35.29	22.15
BASE CLASE 4	49.03	33.41
SUBBASE CLASE 1	38.18	27.49
SUBBASE CLASE 2	38.77	29.64
SUBBASE CLASE 3	41.27	29.88

4.2. Análisis de frecuencias e histogramas

Dada la evaluación de los materiales, se visualiza el comportamiento estadístico, se elaboró histogramas individuales por tipo de capa, utilizando como base los valores de CBR y Módulo de Young obtenidos en cada uno de los parámetros, estos gráficos permitieron identificar la

concentración, dispersión y forma de distribución de los datos de cada clase de material, diferenciado entre capas de base y subbase para cada una de las 18 minas.

4.2.1. Frecuencia global

Antes de realizar los histogramas, se elaboraron tablas de frecuencia globales, una para los valores de CBR y otra para el Módulo de Young, donde estas tablas incluyeron la frecuencia absoluta, relativa y acumulada por intervalo, y fueron de guía para entender la distribución general de las muestras, pero no para ser utilizadas en la elaboración de histogramas porque el enfoque grafico se dio en el análisis por capas.

Tabla 25.

Frecuencia global de CBR en materiales granulares de las minas estudiadas.

INTERVALOS	F. ABSOLUTA	F. RELATIVA	F. ACUMULADA
(25-35]	24	0.190476	24
(35-45]	21	0.166667	45
(45-55]	14	0.111111	59
(55-65]	5	0.039683	64
(65-75]	23	0.18254	87
(75-85]	25	0.198413	112
(85-95]	11	0.087302	123
(95-105]	3	0.02381	126

En la Tabla 25 se puede observar que los intervalos con mayor concentración de datos son (75-85] con 25 observaciones. La mayoría de los materiales evaluados presentan valores de CBR

dentro del rango medio-alto, lo cual es favorable desde el punto de vista estructural, ya que estos materiales ofrecen una buena capacidad de soporte.

Por otro lado, el intervalo más alto (95-105] tiene apenas 3 observaciones, lo que indica que valores extremos de alta resistencia son poco frecuentes en la muestra. Esto ayuda a comprender cómo se comporta la población total de materiales en función de su capacidad de soporte y puede utilizarse para tomar decisiones estadísticas o en la elección de materiales en el diseño estructural de pavimentos.

Tabla 26.

Frecuencia global del Módulo de Young en materiales granulares de las minas estudiadas.

INTERVALOS	F. ABSOLUTA	F. RELATIVA	F. ACUMULADA
(34.65-47.65]	1	0.00793651	1
(47.65-60.65]	4	0.03174603	5
(60.65-73.65]	24	0.19047619	29
(73.65-86.65]	7	0.05555556	36
(86.65-99.65]	29	0.23015873	65
(99.65-112.65]	21	0.16666667	86
(112.65-125.65]	32	0.25396825	118
(125.65-138.65]	8	0.06349206	126

La Tabla 26 se muestra cómo se distribuyen los valores del Módulo de Young agrupados por intervalos, el que se observa que la mayor concentración de datos se encuentra en el intervalo (112.65–125.65] con 32 observaciones, esto indica que la mayoría de los materiales analizados presentan una rigidez media-alta, lo cual es favorable en términos estructurales para las capas de

pavimento. También tiene coherencia con los valores promedio y medianas, previamente analizado.

Mientras que, los intervalos más bajos (34.65–47.65] y (47.65–60.65] contienen solo 1 y 4 observaciones, lo que indica que los materiales con baja rigidez fueron casos excepcionales dentro del conjunto total.

El análisis permite identificar el comportamiento general de la población de materiales y orientar la toma de decisiones en la selección o rechazo de canteras, dependiendo del nivel de rigidez requerido para las distintas capas del pavimento.

4.2.2. Histograma

En la elaboración de los histogramas se hizo con intervalos definidos de acuerdo con el rango y a la cantidad de datos disponibles para cada tipo de capa, en los gráficos se pudo notar aspectos como:

- La concentración de valores en ciertos rangos, dependiendo del tipo de material.
- La asimetría o simetría en la distribución de los datos.
- La comparación visual entre capas de diferente comportamiento estructural.

Este enfoque permitió interpretar con más claridad el comportamiento de cada intervalo de datos, sin mezclar o confundir funciones estructurales diferentes, de esta manera sirvió facilitando el análisis técnico comparativo entre materiales provenientes de las distintas fuentes.

4.2.2.1. Intervalo Base Clase 1

Se observa en la Tabla 27 que la mayor concentración para el CBR se encuentra en los intervalos 70-80, lo que indica que los valores de capacidad de soporte se distribuyen mayormente en la zona media-alta, con algunos valores también concentrados en niveles más bajos, dando una dispersión moderada que influye por la calidad variable del material o las condiciones del ensayo.

Respecto al Módulo de Young, los datos se agrupan principalmente entre 100 y 130 con 11 datos, revelando que la rigidez del material se concentra en rangos altos, más uniformes que los del CBR, demostrando que ambos parámetros llevan a un desempeño estructural favorable.

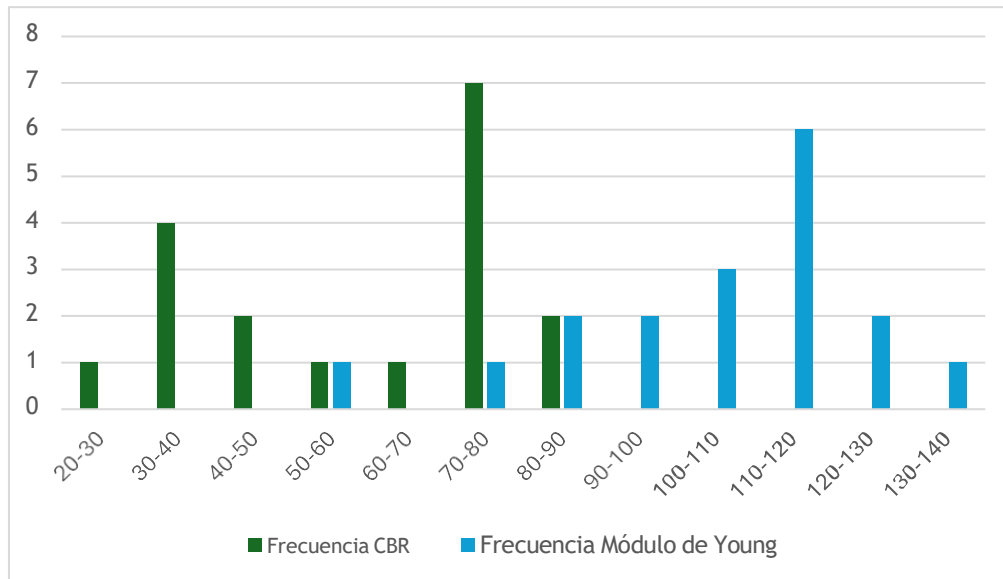
Tabla 27.

Frecuencia CBR y Módulo de Young - Base Clase 1.

Intervalo	Límite inferior	Límite superior	Frecuencia CBR	Frecuencia Módulo de Young
20-30	20	30	1	0
30-40	30	40	4	0
40-50	40	50	2	0
50-60	50	60	1	1
60-70	60	70	1	0
70-80	70	80	7	1
80-90	80	90	2	2
90-100	90	100	0	2
100-110	100	110	0	3
110-120	110	120	0	6
120-130	120	130	0	2
130-140	130	140	0	1

Figura 1.

Histograma de frecuencia del CBR y Módulo de Young - Base Clase 1.



4.2.2.2. Intervalo Base Clase 2

En esta clase se evidencia en la Tabla 28 que los valores de CBR están distribuidos de forma más dispersa que en la Base Clase 1, con presencia tanto en rangos bajos como en medios-altos. Por otro lado, el Módulo de Young presenta su mayor concentración en los mismos intervalos que en la Base Clase 1, donde los valores de rigidez tienden a ubicarse en rangos altos, con menos dispersión y mayor homogeneidad.

Tabla 28.

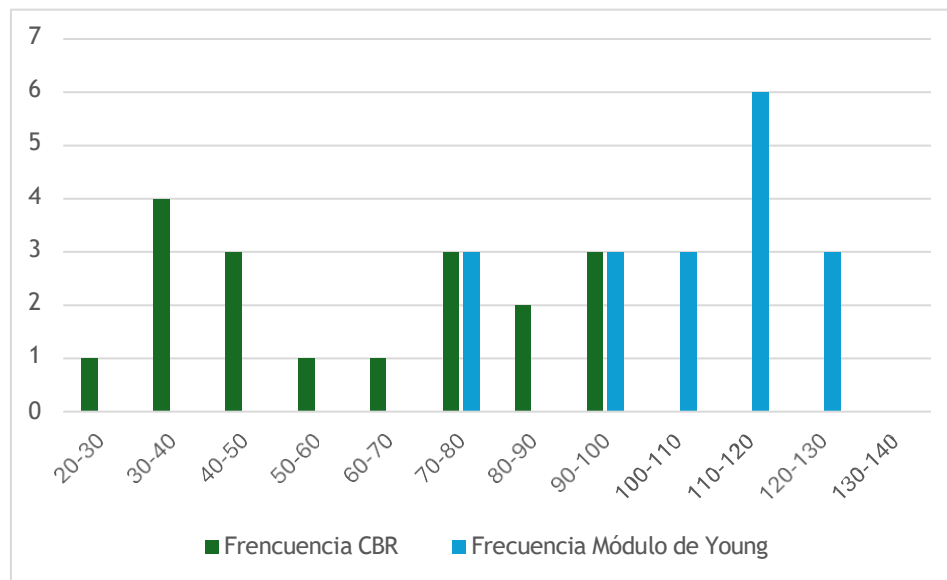
Frecuencia CBR y Módulo de Young - Base Clase 2.

Intervalo	Límite inferior	Límite superior	Frecuencia CBR	Frecuencia Módulo de Young
20-30	20	30	1	0
30-40	30	40	4	0
40-50	40	50	3	0

50-60	50	60	1	0
60-70	60	70	1	0
70-80	70	80	3	3
80-90	80	90	2	0
90-100	90	100	3	3
100-110	100	110	0	3
110-120	110	120	0	6
120-130	120	130	0	3
130-140	130	140	0	0

Figura 2

Histograma de frecuencia del CBR y Módulo de Young - Base Clase 2.



4.2.2.3. Intervalo Base Clase 3

En la Tabla 29, la distribución de del CBR se encuentra principalmente en el intervalo 70-80 con 5 datos, concentrándose en rangos medios-altos, aunque también hay presencia de valores en el extremo inferior 20-30 con 2 datos y muy pocos por encima de 80, siendo una dispersión moderada. Por su parte, el Módulo de Young se agrupa en los intervalos superiores a 100, notándose nuevamente una concentración en valores altos de rigidez, mostrando una mejor distribución continua hacia valores altos, indicando ser un material más consistente en términos de rigidez.

Tabla 29.

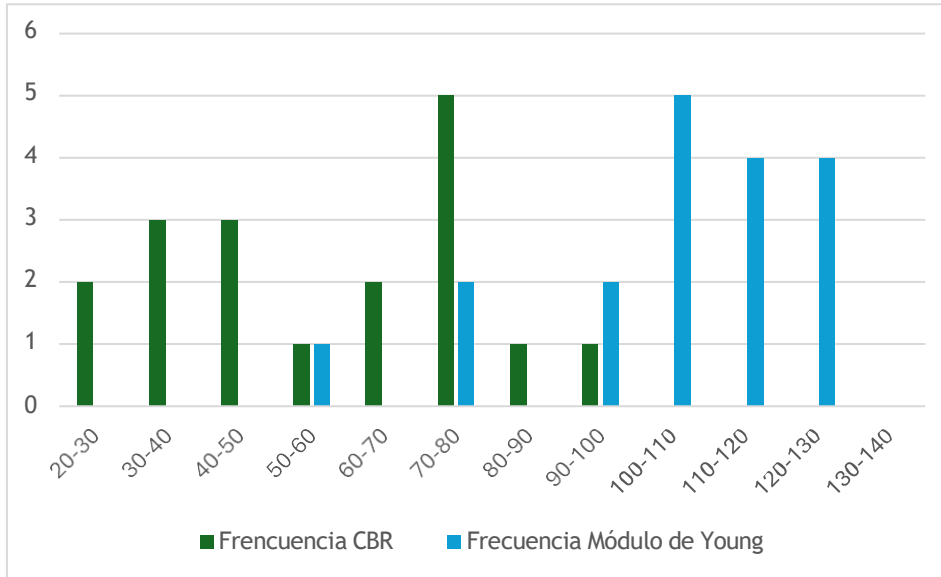
Frecuencia CBR y Módulo de Young - Base Clase 3.

intervalo	Límite inferior	Límite superior	Frecuencia CBR	Frecuencia Módulo de Young
20-30	20	30	2	0
30-40	30	40	3	0
40-50	40	50	3	0
50-60	50	60	1	1
60-70	60	70	2	0
70-80	70	80	5	2
80-90	80	90	1	0
90-100	90	100	1	2
100-110	100	110	0	5
110-120	110	120	0	4
120-130	120	130	0	4

130-140	130	140	0	0
---------	-----	-----	---	---

Figura 3.

Histograma de frecuencia del CBR y Módulo de Young - Base Clase 1.



4.2.2.4. Intervalo Base Clase 4

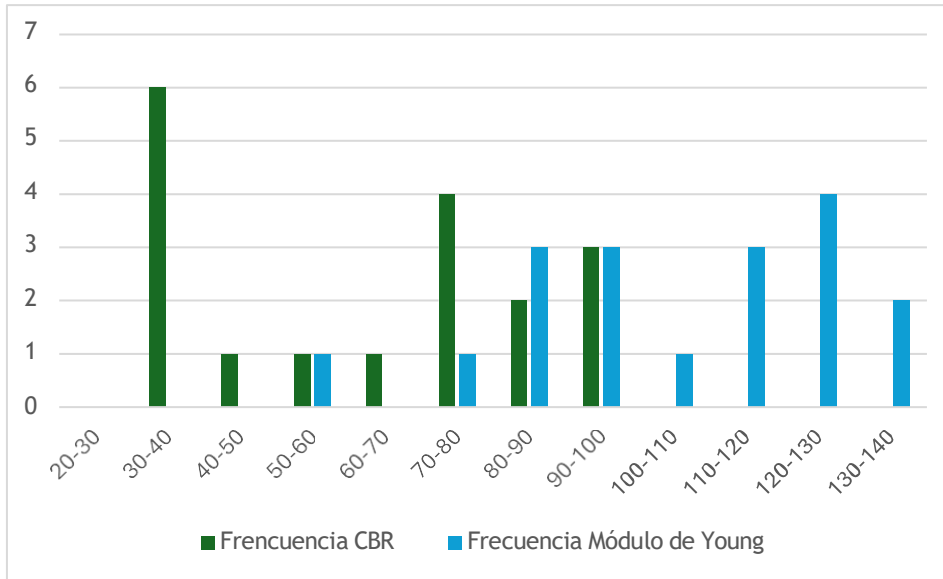
Para la Base Clase 4 se evidencia en la Tabla 30, al CBR con una tendencia a la dispersión moderada, los datos repartidos en varios intervalos sin una concentración dominante, esto refleja una distribución bimodal, con valores acumulados tanto en el rango bajo de 30-40, como en los altos de 70-100, lo que indica una posible variabilidad en el material o en las condiciones como la humedad o compactación del ensayo, es la clase con la base de mayor varianza en CBR 593.13, que refleja lo visto en esta dispersión. Mientras que el Módulo de Young tiene los valores más agrupados, esta distribución sigue con el mismo patrón observado en otras bases, con mayor igualdad en la rigidez concentrándose principalmente entre los 90 y 120 MPa, lo cual demuestra un comportamiento mecánico favorable desde el punto de vista estructural.

Tabla 30.*Frecuencia CBR y Módulo de Young - Base Clase 4.*

Intervalo	Límite inferior	Límite superior	Frecuencia CBR	Frecuencia Módulo de Young
20-30	20	30	0	0
30-40	30	40	6	0
40-50	40	50	1	0
50-60	50	60	1	1
60-70	60	70	1	0
70-80	70	80	4	1
80-90	80	90	2	3
90-100	90	100	3	3
100-110	100	110	0	1
110-120	110	120	0	3
120-130	120	130	0	4
130-140	130	140	0	2

Figura 4.

Histograma de frecuencia del CBR y Módulo de Young - Base Clase 4.



4.2.2.5. Intervalo Subbase Clase 1

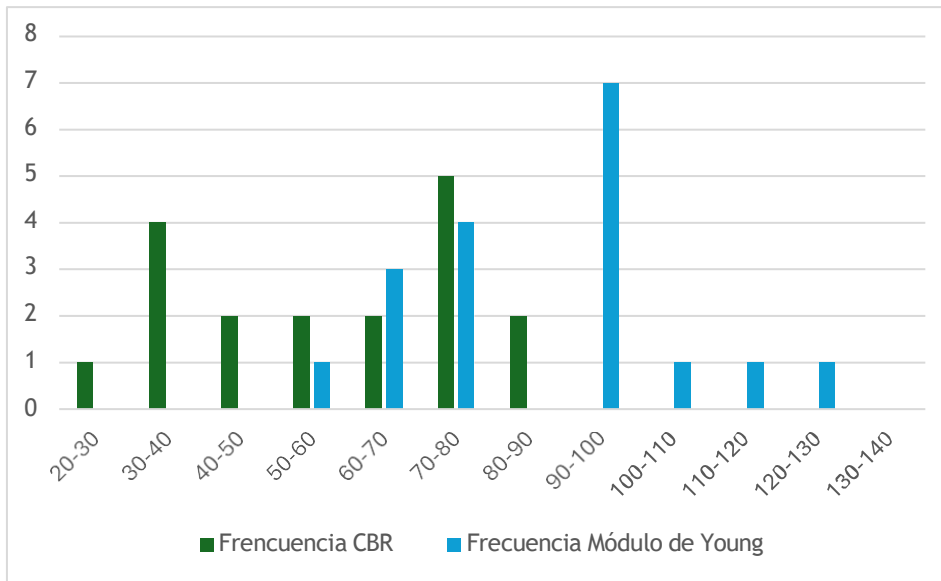
Los valores de CBR presentes en la Tabla 31 de la distribución son moderadas hacia los intervalos medios, reflejando un patrón de doble concentración, una parte con desempeño bajo-medio en el intervalo 30-60, y la otra parte con desempeño más favorable en el intervalo 70-80, estos desempeños pueden ser por el origen del material o por el nivel de compactación aplicado. En cuanto al Módulo de Young, la distribución evidencia mayor concentración en los intervalos superiores, a pesar de las diferencias en el CBR, los materiales mantienen una buena rigidez estructural, lo que puede significar un buen control en la compactación o una calidad aceptable del agregado.

Tabla 31.*Frecuencia CBR y Módulo de Young - Subbase Clase 1*

Intervalo	Límite inferior	Límite superior	Frecuencia CBR	Frecuencia Módulo de Young
20-30	20	30	1	0
30-40	30	40	4	0
40-50	40	50	2	0
50-60	50	60	2	1
60-70	60	70	2	3
70-80	70	80	5	4
80-90	80	90	2	0
90-100	90	100	0	7
100-110	100	110	0	1
110-120	110	120	0	1
120-130	120	130	0	1
130-140	130	140	0	0

Figura 5.

Histograma de frecuencia del CBR y Módulo de Young - Subbase Clase 1.



4.2.2.6. Intervalo Subbase Clase 2

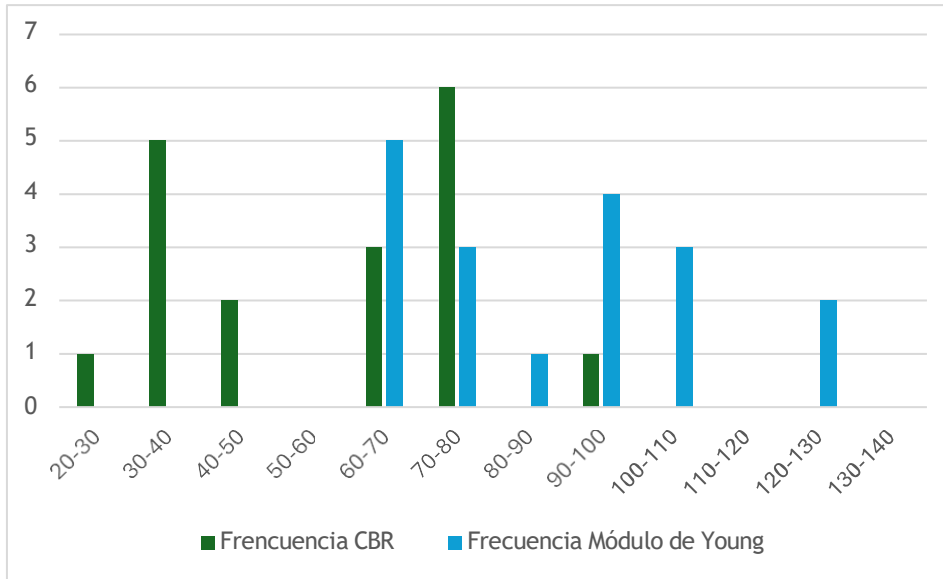
En la Tabla 32 de la Subbase Clase 2 los valores de CBR se concentran principalmente en los intervalos 30-40,60-80, sugiriendo una doble agrupación de los valores de este índice, siendo una en los rangos bajos y otra en los medios-altos, lo que refleja una variación moderada del material en la capacidad de soporte. Los valores del Módulo de Young se agrupan de forma más clara en los tramos superiores 60-80 y 90-110, confirmando que el material estructural presenta buena rigidez de forma general con baja presencia en los rangos inferiores, la mayor parte de la rigidez se concentra entre 60 y 100 MPa, lo que es bueno para el desempeño del pavimento, aunque no garantice una alta capacidad de soporte en todos los casos.

Tabla 32.*Frecuencia CBR y Módulo de Young - Subbase Clase 2.*

Intervalo	Límite inferior	Límite superior	Frecuencia CBR	Frecuencia Módulo de Young
20-30	20	30	1	0
30-40	30	40	5	0
40-50	40	50	2	0
50-60	50	60	0	0
60-70	60	70	3	5
70-80	70	80	6	3
80-90	80	90	0	1
90-100	90	100	1	4
100-110	100	110	0	3
110-120	110	120	0	0
120-130	120	130	0	2
130-140	130	140	0	0

Figura 6.

Histograma de frecuencia del CBR y Módulo de Young - Subbase Clase 2.



4.2.2.7. Intervalo Subbase Clase 3

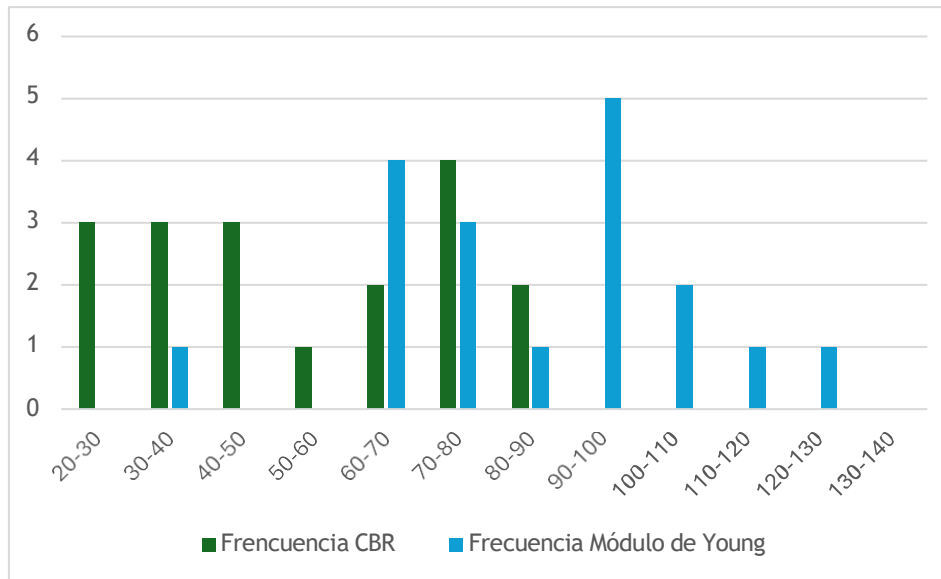
En esta clase, presente en la Tabla 33 con los valores de CBR se reparten de forma equitativa, este comportamiento refleja una alta dispersión, con baja concentración en rangos específicos, lo que indica una heterogeneidad importante en la capacidad de soporte, el desempeño estructural puede resultar inconsistente en campo. Por su parte, el Módulo de Young muestra mayor concentración en los intervalos 60-70 y 90-100, indicando una distribución de rigidez mejor estructurada y concentrada en los rangos superiores, aunque presente cierta variabilidad, lo que permitió se alinea con el comportamiento observado en otras subbases, donde la rigidez esta más controlada, mientras que el CBR muestra una dispersión más elevada.

Tabla 33.*Frecuencia CBR y Módulo de Young - Subbase Clase 3.*

Intervalo	Límite inferior	Límite superior	Frecuencia CBR	Frecuencia Módulo de Young
20-30	20	30	3	0
30-40	30	40	3	1
40-50	40	50	3	0
50-60	50	60	1	0
60-70	60	70	2	4
70-80	70	80	4	3
80-90	80	90	2	1
90-100	90	100	0	5
100-110	100	110	0	2
110-120	110	120	0	1
120-130	120	130	0	1
130-140	130	140	0	0

Figura 7.

Histograma de frecuencia del CBR y Módulo de Young - Subbase Clase 3.



4.3. Análisis de correlación y regresión

Con la finalidad de hacer sólido una relación útil entre el índice CBR y el Módulo de Young, se pudo emplear un análisis estadístico de correlación y regresión lineal y no lineales como el exponencial, logarítmico, polinómica de segundo y tercer grado a nivel general y por tipo de capa.

4.3.1. Resultados generales

4.3.1.1. Modelo regresión lineal

Para todos los datos recopilados de las 18 minas, se obtuvo un coeficiente de correlación de Pearson ($r = 0.4755$), dicho resultado indica una correlación lineal positiva de intensidad moderada entre ambas variables de CBR y Módulo de Young, de acuerdo con este resultado se sugiere que la mayor rigidez del material (Módulo de Young) hay una tendencia a obtener resultados más elevados CBR, pero no de forma proporcional, ni uniforme.

Con el análisis de regresión lineal en la Figura 8, se obtuvo la siguiente ecuación que se estima para poder predecir el CBR en función del Módulo de Young:

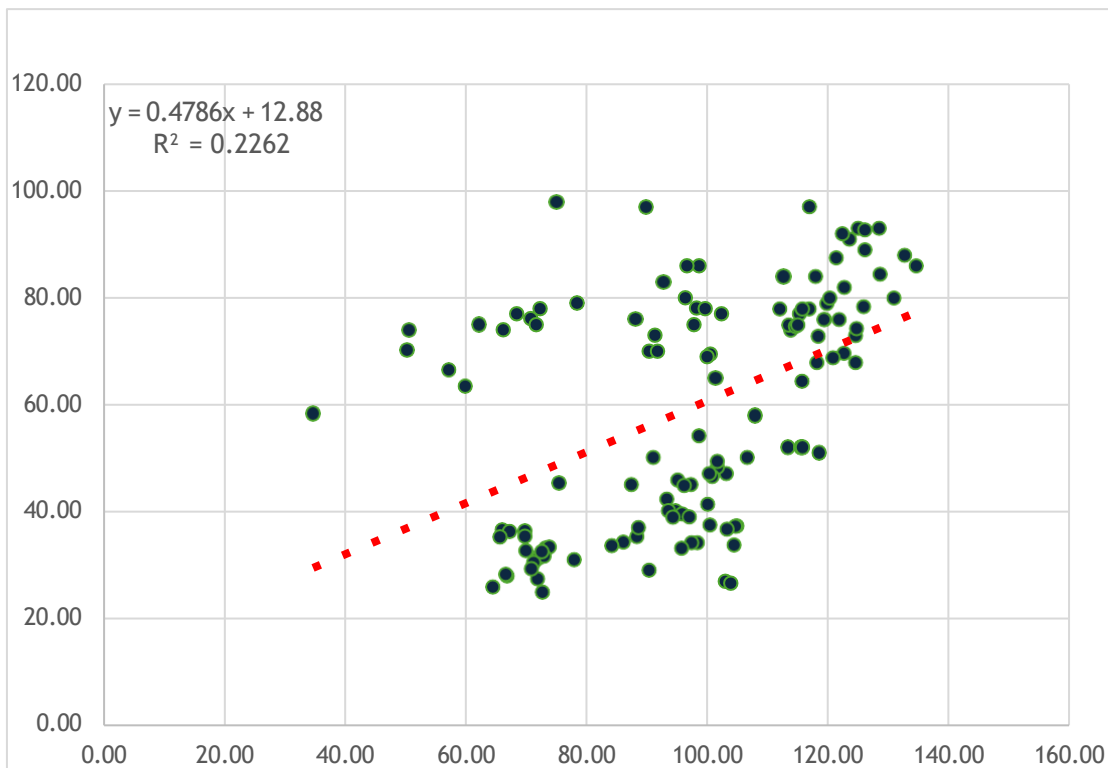
$$CBR = 0.4786 \times E + 12.88 \quad (13)$$

Donde:

- CBR : índice de soporte del material en porcentaje.
- E : Módulo de Young en MPa

Figura 8.

Correlación lineal general entre el CBR y el Módulo de Young.



El coeficiente de determinación R^2 asociado fue de aproximadamente 0.2262, lo que indica que el modelo explica un 22.62% de la variabilidad del CBR a partir del Módulo de Young. Si bien se evidencia una tendencia creciente en la nube de puntos, también se aprecia una dispersión considerable, lo cual confirma que no existe una relación lineal fuerte entre ambas variables.

A pesar de sus limitaciones, este modelo puede ser útil como herramienta preliminar para estimar el CBR cuando solo se dispone del Módulo de Young, siempre que se sepa su capacidad predictiva moderada, es decir, que no tiene un porcentaje elevado de precisión.

4.3.1.1. Modelo exponencial

Se realizó en la Figura 9 una función del tipo:

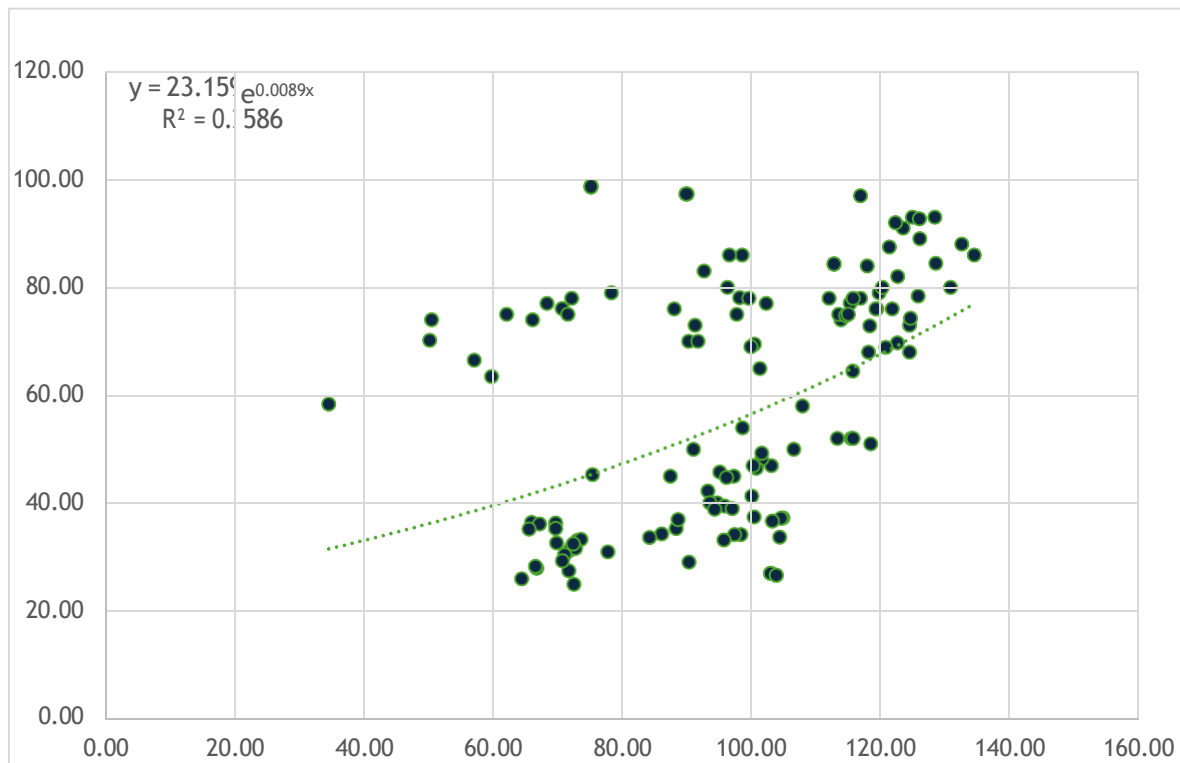
$$CBR = 23.159 \times e^{0.0089E} \quad (14)$$

$$R^2 = 0.2586$$

Este modelo mostró una ligera mejora respecto al modelo lineal. Representa un crecimiento gradual del CBR conforme aumenta el Módulo de Young. Sin embargo, no refleja bien las caídas bruscas de CBR observadas en algunos tramos.

Figura 9.

Modelo exponencial general entre el CBR y el Módulo de Young.



4.3.1.2. Modelo logarítmico

Se evaluó una función logarítmica en la Figura 10:

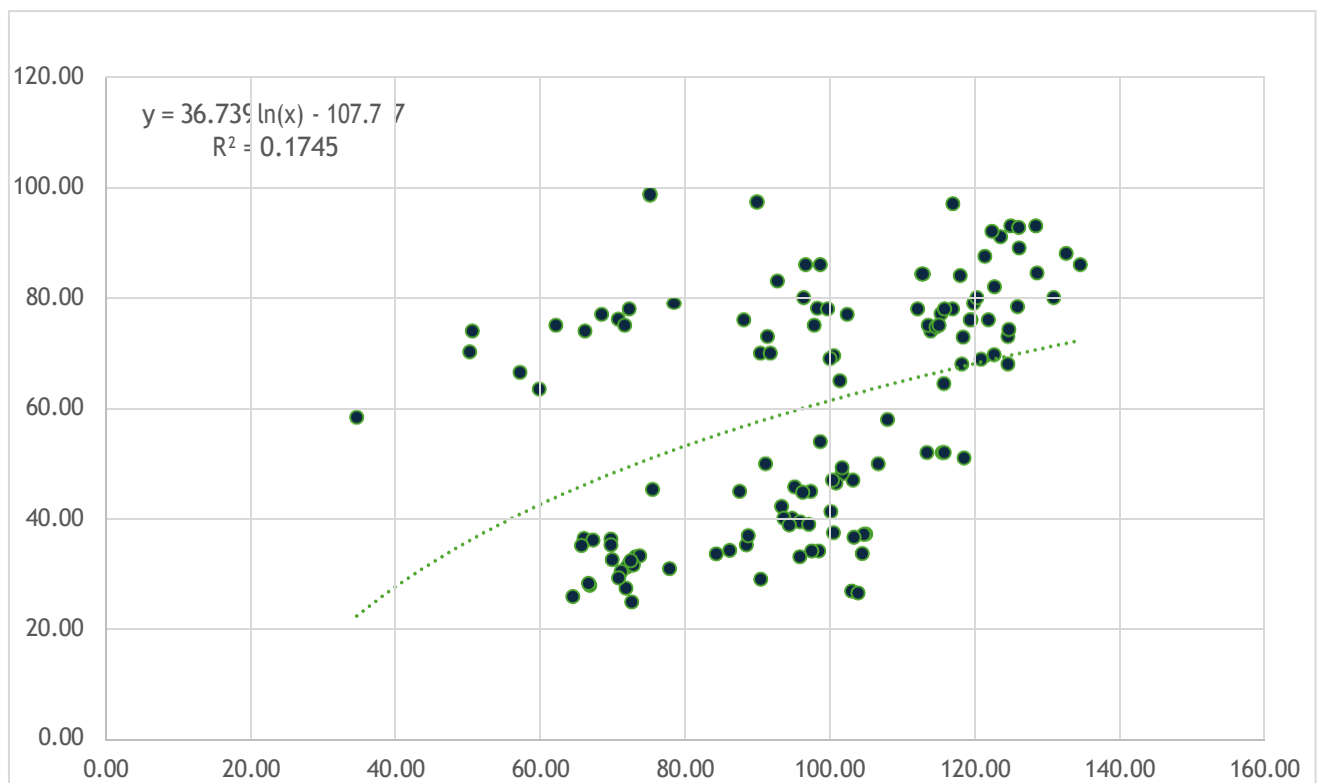
$$CBR = 36.739 \times \ln(E) - 107.77 \quad (15)$$

$$R^2 = 0.1745$$

Este modelo arrojó el peor ajuste. El bajo valor de R^2 indica que el comportamiento del CBR no guarda una relación logarítmica clara con el Módulo de Young, por lo que no se recomienda su uso en este contexto.

Figura 10.

Modelo logarítmico general entre el CBR y el Módulo de Young.



4.3.1.3. Modelo polinómico de segundo grado

Una vez obtenida la Figura 11 se probó una función cuadrática:

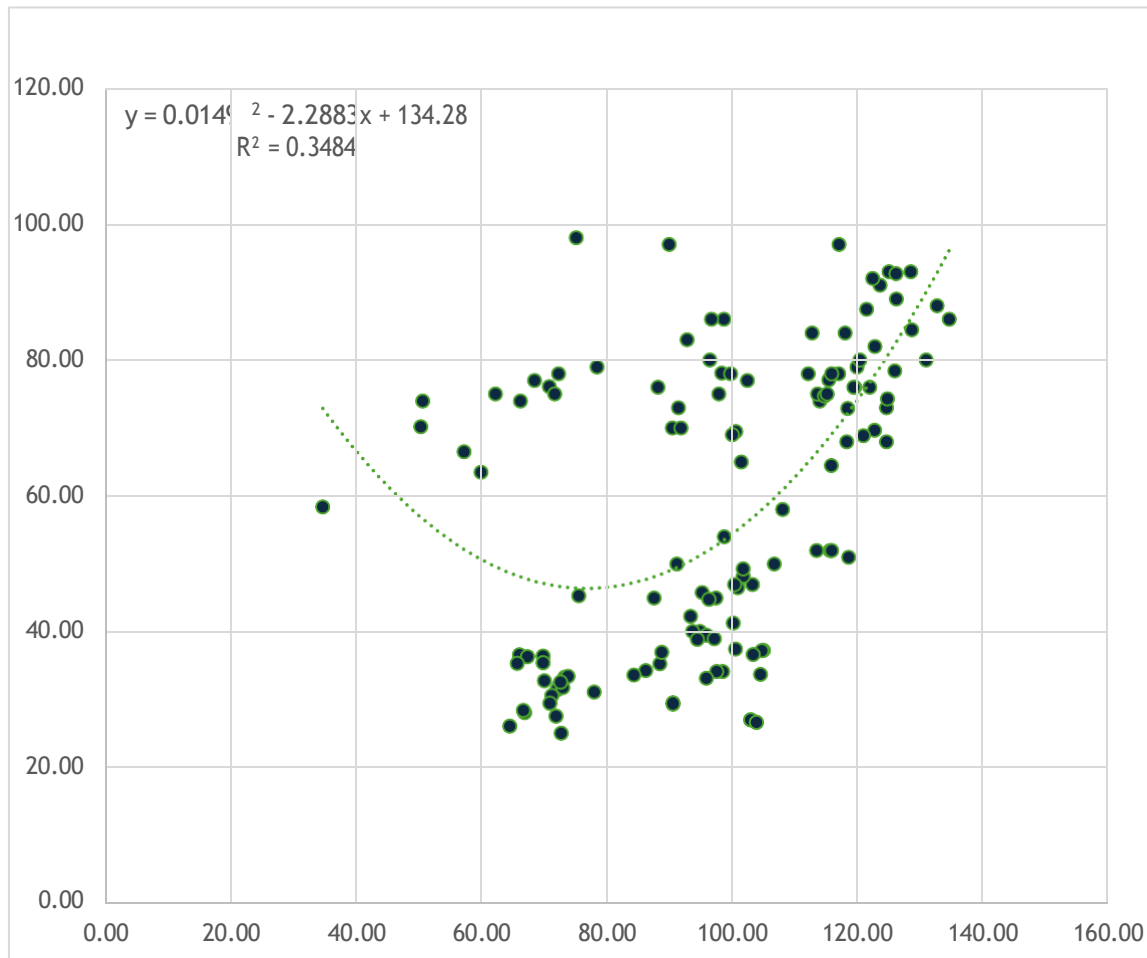
$$CBR = 0.0149 \times E^2 - 2.2883 \times E + 134.28 \quad (16)$$

$$R^2 = 0.3484$$

Este modelo presentó una mejora notable en el ajuste. La forma parabólica ayuda a representar mejor el comportamiento del CBR para valores altos y bajos del Módulo de Young. Es uno de los modelos más recomendables dentro de los evaluados.

Figura 11.

Modelo polinómico de segundo grado general entre el CBR y el Módulo de Young.



4.3.1.4. Modelo polinómico de tercer grado.

Finalmente, obtenida la Figura 12 se probó una función cúbica:

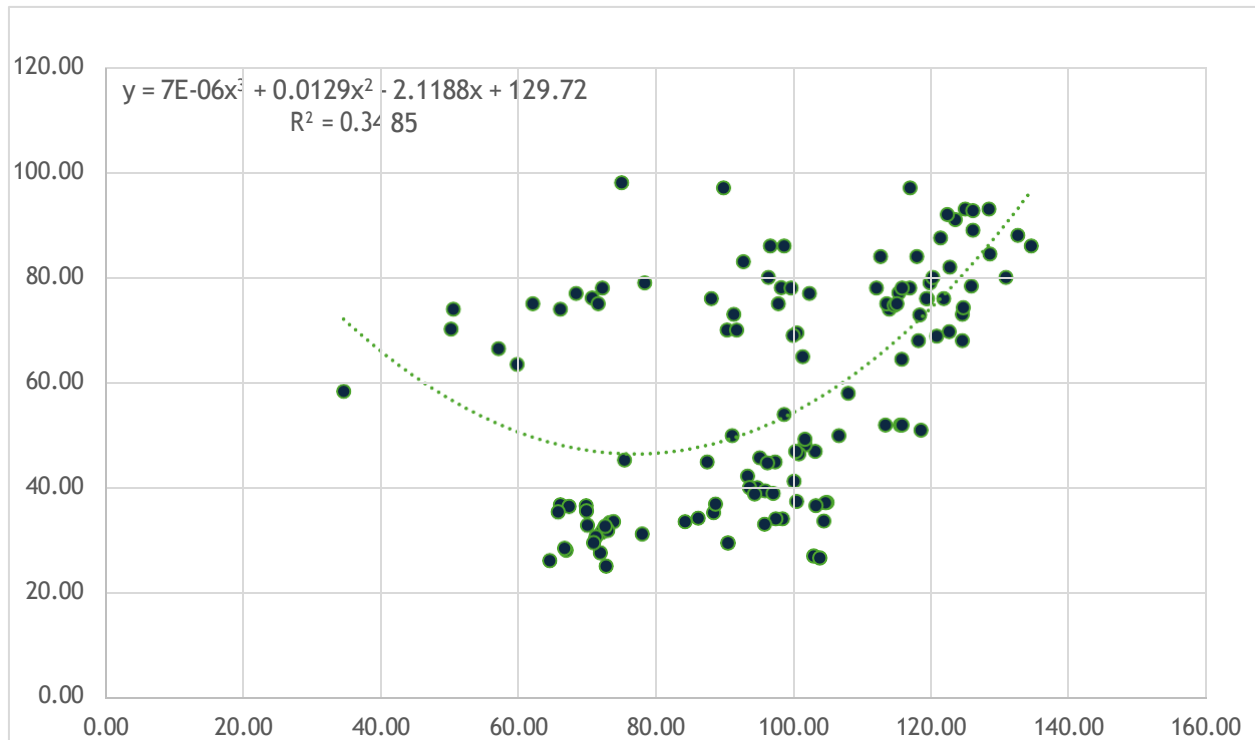
$$CBR = 7E^{-6} \times E^3 + 0.0129 \times E^2 - 2.1188 \times E + 129.72 \quad (17)$$

$$R^2 = 0.3485$$

Este modelo obtuvo el mayor valor de R^2 , aunque la mejora respecto al modelo cuadrático fue marginal. Por su complejidad y sensibilidad a valores extremos, su aplicación debe hacerse con cuidado.

Figura 12.

Modelo polinómico de tercer grado general entre el CBR y el Módulo de Young.



4.3.1.5. Comparación de resultados generales

A continuación, se presenta un resumen de los coeficientes de determinación obtenidos:

Tabla 34.

Ecuaciones lineales y no lineales obtenidos de las gráficas.

Modelo	Ecuación	R ²
Lineal	$CBR = 0.4786 \cdot E + 12.88$	0.2262
Exponencial	$CBR = 23.159 \cdot e^{(0.0089 \cdot E)}$	0.2586
Logarítmico	$CBR = 36.739 \cdot \ln(E) - 107.77$	0.1745
Polinómico (2° grado)	$CBR = 0.0149 \cdot E^2 - 2.2883 \cdot E + 134.28$	0.3484
Polinómico (3° grado)	$CBR = 7E^{-6} \cdot E^3 + 0.0129 \cdot E^2 - 2.1188 \cdot E + 129.72$	0.3485

4.3.2. Resultados por tipo de capa

A pesar de que el análisis principal se realizó mediante regresión lineal simple, se identificó que el coeficiente de determinación obtenido ($R^2 = 0.2262$) refleja una capacidad limitada del modelo para explicar la variabilidad del índice CBR en función del Módulo de Young. Por ello, se exploraron los modelos anteriormente mencionados para la capa Base Clase 3 y la Subbase Clase 3.

4.3.2.1. Modelo regresión lineal – Base Clase 3

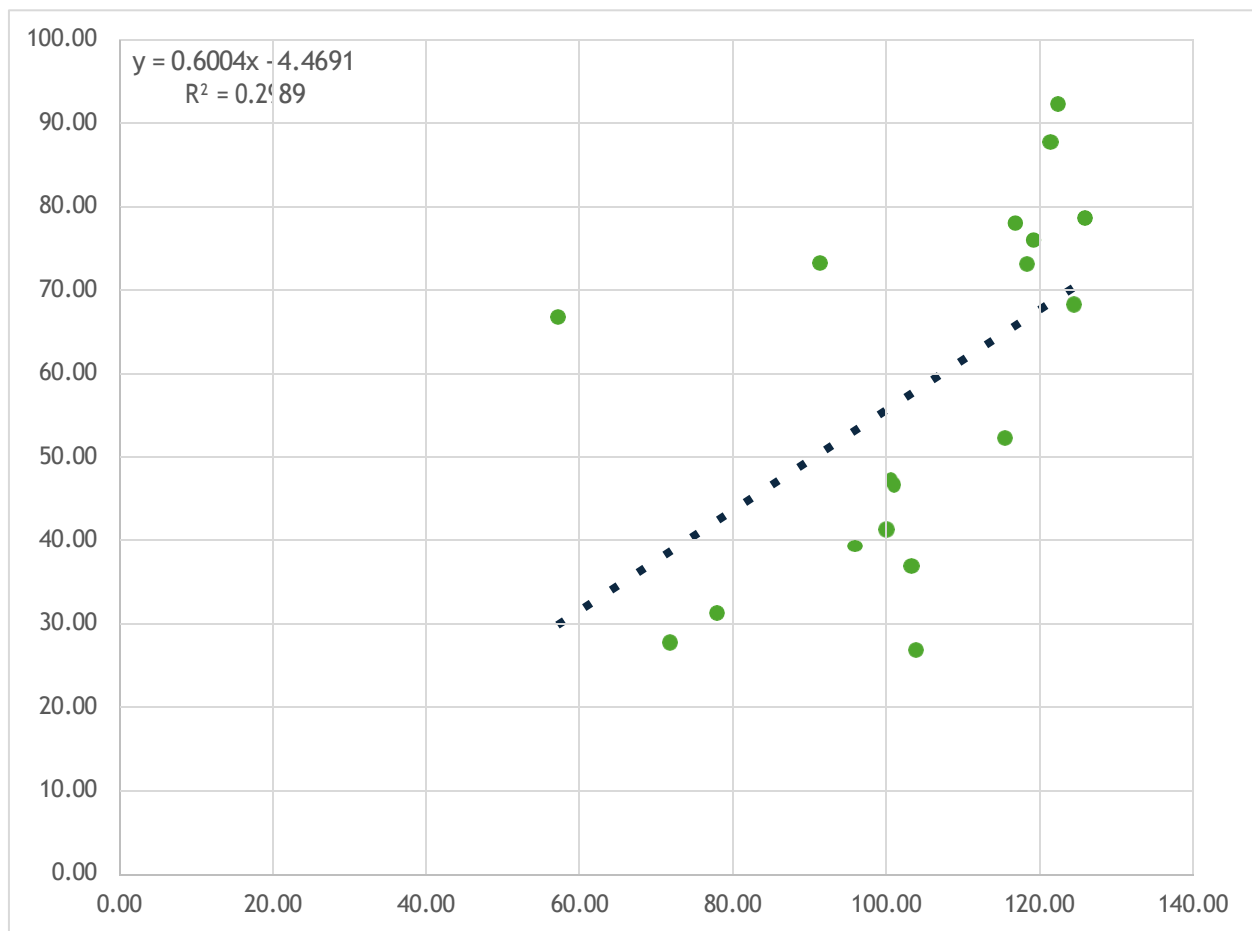
En la Figura 13 presentada se muestra la regresión lineal entre el Módulo de Young para el eje X y el índice CBR para el eje Y para los materiales clasificados como Base Clase 3, se obtuvo el modelo de ecuación:

$$CBR = 0.6004 \times E - 4.4691 \quad (18)$$

Esto indica que por cada unidad que aumenta el Módulo de Young, el valor del CBR se incrementa en aproximadamente 0.6 unidades, con un valor de $R^2 = 0.2989$ que significa que el 29.89% de la variabilidad del CBR puede explicarse por el Módulo de Young mediante este modelo lineal. Aunque es mayor que el modelo general de todas las minas, que tenía un $R^2 = 0.2262$, aún no representa una correlación fuerte, pero sí muestra una mejora al analizar por tipo de capa, esto evidencia que el análisis por clase de material permite encontrar relaciones más representativas.

Figura 13.

Correlación lineal entre el CBR y Módulo de Young en la Base Clase 3.



4.3.2.2. Modelo regresión exponencial – Base Clase 3

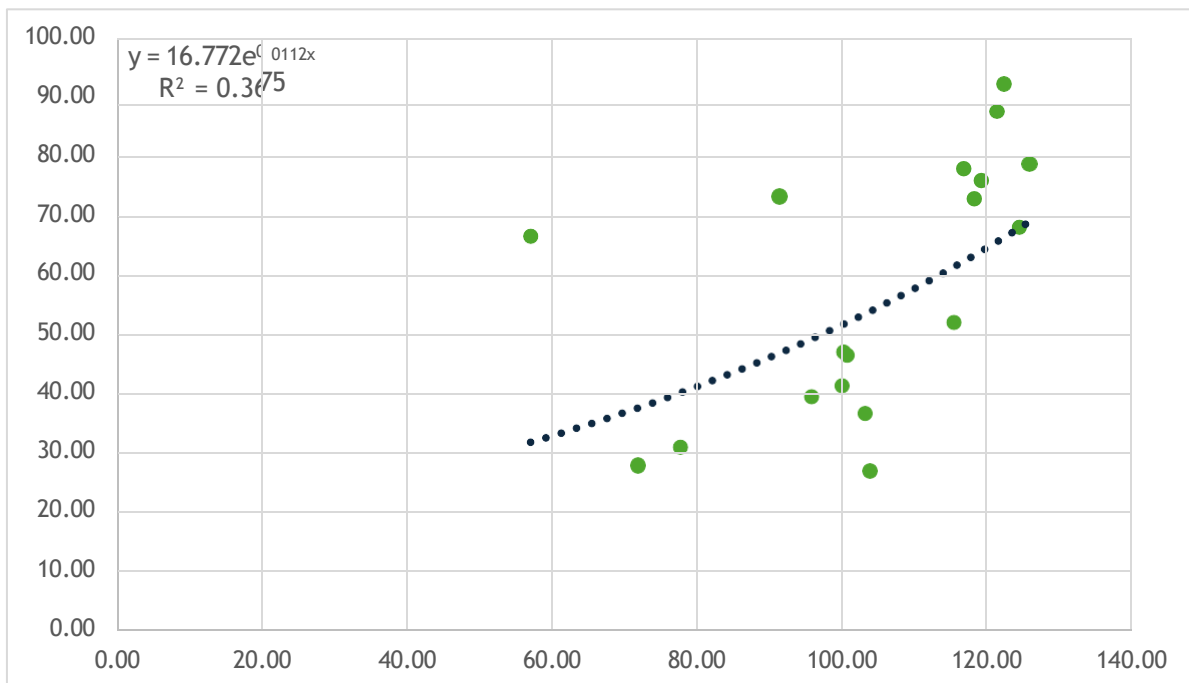
Con la Figura 14 se obtuvo el modelo de ecuación (19) que representa un modelo exponencial en el que el índice CBR aumenta a medida que el Módulo de Young crece, pero no de forma lineal, sino acelerada. Es decir, los incrementos en el CBR son más pronunciados a medida que los valores de rigidez aumentan.

$$CBR = 16.772e^{0.0112E} \quad (19)$$

Este comportamiento refleja una mejor adaptación a la tendencia creciente observada en los datos de la Base Clase 3, comparado con el modelo lineal. El valor de $R^2=0,3675$ indica que el 36,75% de la variación del CBR puede explicarse por la variación del Módulo de Young utilizando este modelo exponencial, esto significa que se logra una mejora considerable respecto al modelo lineal. Aunque la correlación aún es moderada, el modelo describe mejor la relación no lineal entre las variables, captando mejor los aumentos del CBR en valores altos de E.

Figura 14.

Modelo exponencial entre el CBR y Módulo de Young para la Base Clase 3.



4.3.2.3. Modelo regresión logarítmico – Base Clase 3

El modelo de ecuación obtenido en la Figura 15 representa una relación logarítmica creciente entre el Módulo de Young y el índice CBR. En este caso, a medida que el Módulo de Young aumenta, el CBR también lo hace, pero de forma más suave y progresiva. El comportamiento del modelo indica que, aunque existe una correlación, los incrementos de rigidez producen mejoras en el CBR que se estabilizan en valores altos.

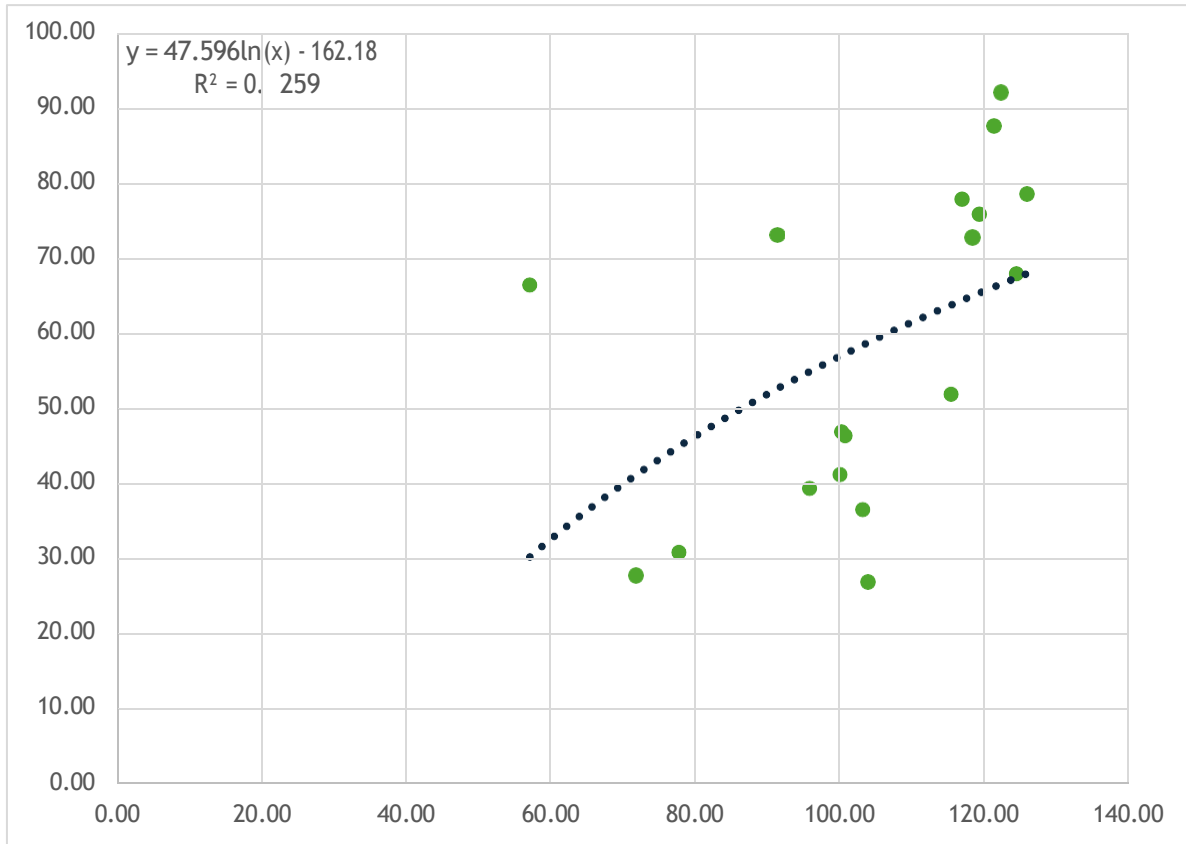
$$CBR = 47.596 \times \ln(E) - 162.18 \quad (20)$$

Este tipo de relación puede reflejar una saturación en la capacidad de soporte del material, es decir, después de cierto punto, aumentar la rigidez no produce mejoras tan notables en el CBR.

El coeficiente $R^2=0,2259$ indica que aproximadamente el 22.59% de la variabilidad del CBR puede ser explicada por el Módulo de Young utilizando este modelo logarítmico, esto quiere decir que es un modelo con bajo poder explicativo, el más bajo de los analizados hasta ahora para la Base Clase 3, el cual refleja que los datos presentan una dispersión importante y que la forma logarítmica no representa bien la tendencia general. Es menos preciso que el modelo exponencial ($R^2 = 0.3675$) y el modelo lineal ($R^2 = 0.2989$) para esta clase de material.

Figura 15.

Modelo logarítmico entre el CBR y Módulo de Young para la Base Clase 3.



4.3.2.4. Modelo regresión polinómico de segundo grado – Base Clase 3

En este modelo la Figura 16 representa una curva cuadrática que ajusta la relación entre el Módulo de Young y el índice CBR para los materiales clasificados como Base Clase 3. El término cuadrático introduce una forma parabólica que permite capturar cambios de tendencia en los datos, a diferencia de los modelos anteriores.

$$CBR = 0.0296 \times E^2 - 5.0321 \times E + 250.81 \quad (21)$$

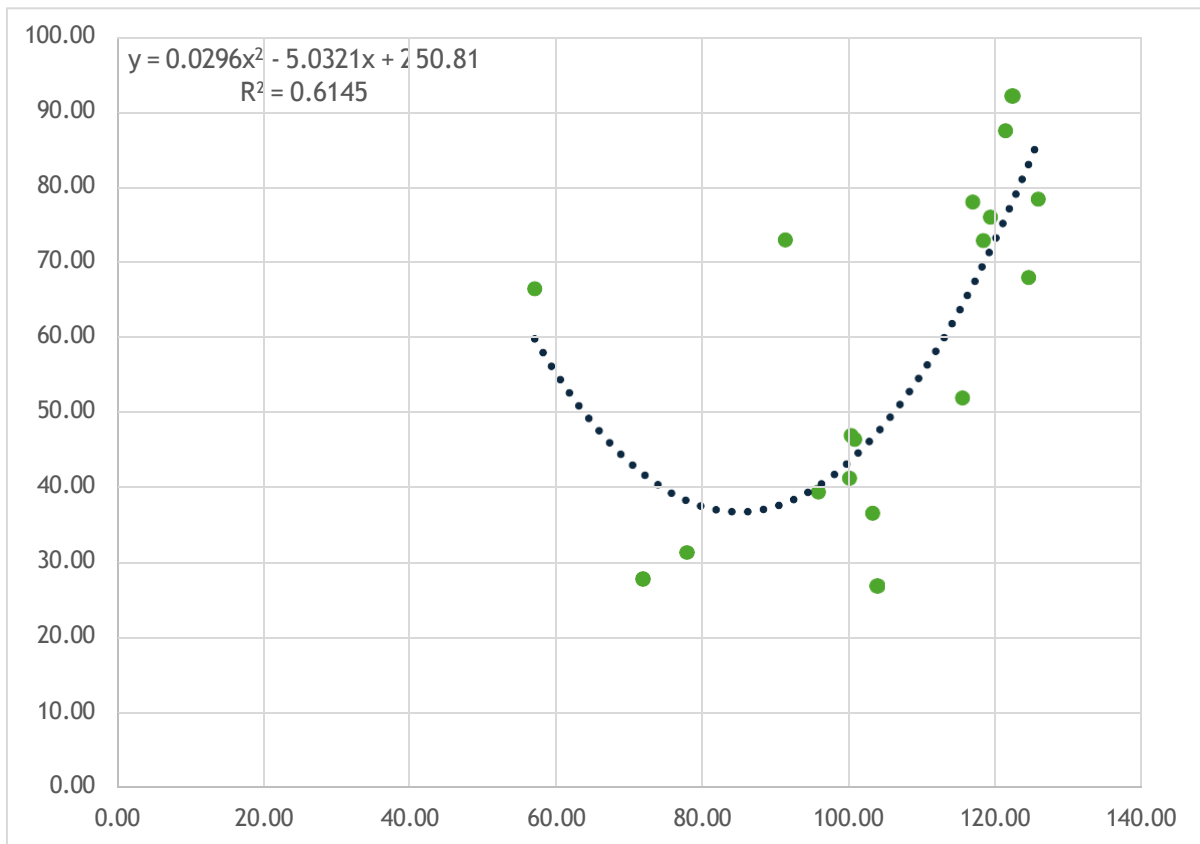
La forma de la curva indica que el CBR disminuye con el Módulo de Young hasta cierto punto y luego vuelve a aumentar, lo cual puede reflejar comportamientos reales de materiales granulares que no siempre tienen una relación lineal simple entre rigidez y capacidad de soporte.

El valor de $R^2 = 0,6145$ es el más alto hasta ahora para esta clase de base, esto significa que aproximadamente el 61,5% de la variación en el CBR puede explicarse por este modelo cuadrático del Módulo de Young, es un nivel aceptable de ajuste, especialmente tratándose de materiales no tratados y naturales.

Este modelo sugiere que para la Base Clase 3, la relación entre el Módulo de Young y el CBR no es estrictamente lineal, sino que presenta un comportamiento curvo que podría deberse a la influencia de otros factores físicos como compactación, humedad o distribución granulométrica.

Figura 16.

Modelo polinómico de segundo grado entre el CBR y Módulo de Young para la Base Clase 3.



4.3.2.5. Modelo regresión polinómico de tercer grado – Base Clase 3

Este modelo representado en la Figura 17 incorpora un término cúbico, lo que permite una curva más compleja que puede capturar mejor las fluctuaciones presentes en los datos. En este caso, el comportamiento se vuelve más adaptable ante patrones no lineales reales de los materiales, obteniendo la ecuación:

$$CBR = -0.0002 \times E^3 + 0.0945 \times E^2 - 10.877 \times E + 419.03 \quad (22)$$

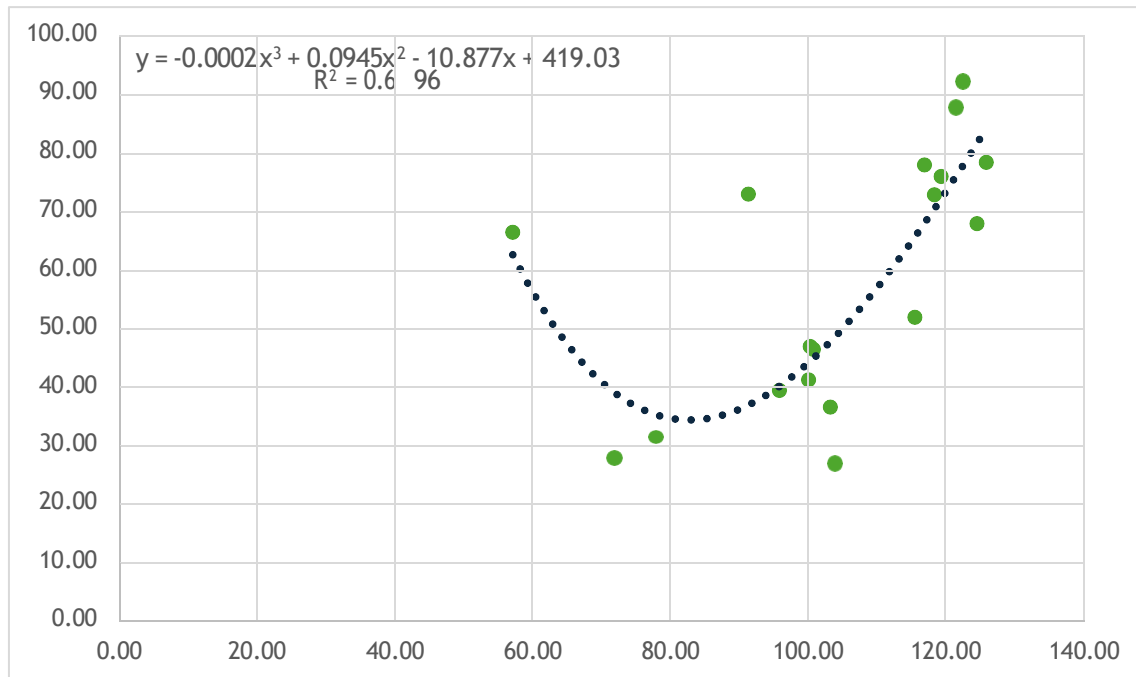
El valor de $R^2 = 0,6196$ indica que aproximadamente el 61,96% de la variabilidad en el CBR puede explicarse mediante esta ecuación cúbica (22) del Módulo de Young. Aunque la mejora frente al modelo cuadrático anterior es mínima, es el valor más alto entre todos los modelos probados para esta clase de material. La forma de la curva refleja una tendencia de caída y posterior aumento, lo cual coincide con el comportamiento real de ciertos materiales granulares ante incrementos en rigidez, donde después de cierto punto los aumentos de módulo pueden no representar aumentos lineales en capacidad de soporte.

Este modelo es el que mejor se ajusta a los datos de la Base Clase 3, superando incluso al modelo polinómico de segundo grado. Sin embargo, debido a su complejidad, su uso debe ser más controlado y bien justificado, ya que puede sobreajustarse si se aplica fuera del rango de datos observados o en otras clases de material.

La ecuación puede usarse como una herramienta de predicción preliminar del CBR solo dentro del rango de valores del Módulo de Young de esta muestra específica, y con validación adicional si se desea utilizar en diseño estructural.

Figura 17.

Modelo polinómico de tercer grado entre el CBR y Módulo de Young para la Base Clase 3.



4.3.2.6. Modelo regresión lineal – Subbase Clase 3

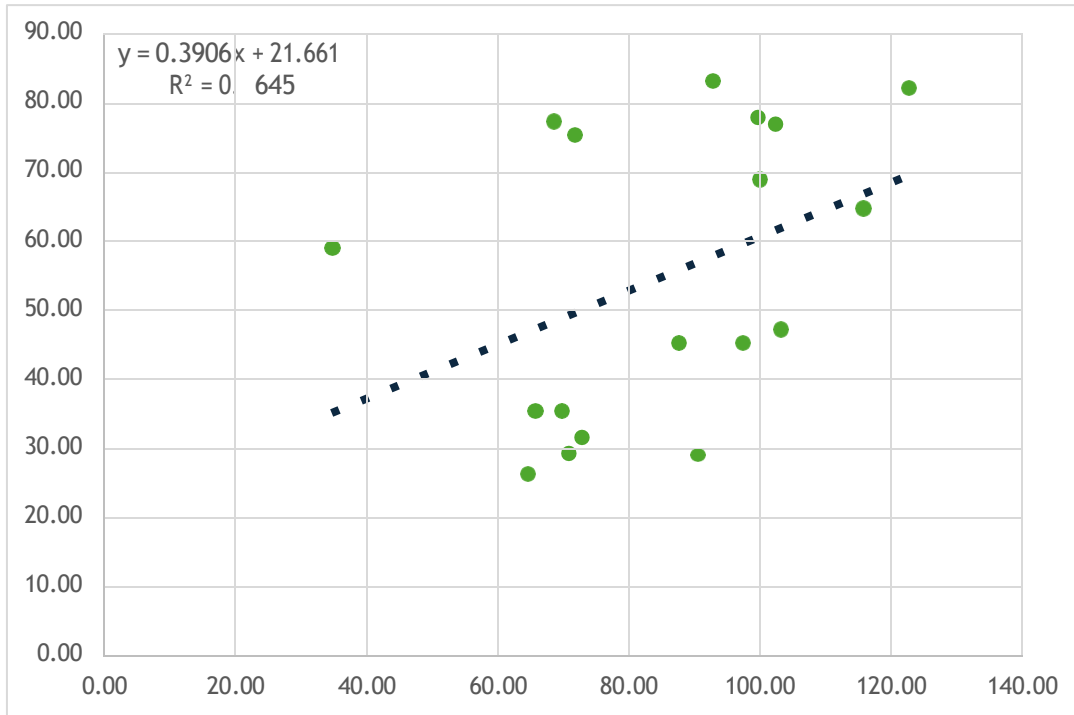
Este modelo plantea una relación lineal directa entre el CBR y el Módulo de Young, donde por cada incremento unitario en el valor del Módulo de Young, se espera que el CBR aumente aproximadamente en 0,3906 unidades, partiendo desde un valor base de 21,661 como se indica en la siguiente ecuación.

$$CBR = 0.3906 \times E + 21.661 \quad (23)$$

El valor de $R^2 = 0,1645$ indica que solo el 16,45% de la variabilidad del CBR es explicada por esta ecuación lineal, es un valor bajo que implica que la relación lineal no es muy fuerte en esta clase de material.

Figura 18.

Correlación lineal entre el CBR y Módulo de Young en la Subbase Clase 3.



4.3.2.7. Modelo regresión exponencial – Subbase Clase 3

En la Figura 19 establece una relación exponencial creciente entre el CBR y el Módulo de Young. En base de la función exponencial indica que a medida que aumenta el Módulo de Young, el CBR también se incrementa, pero lo hace de forma acelerada en lugar de constante, como en el modelo lineal.

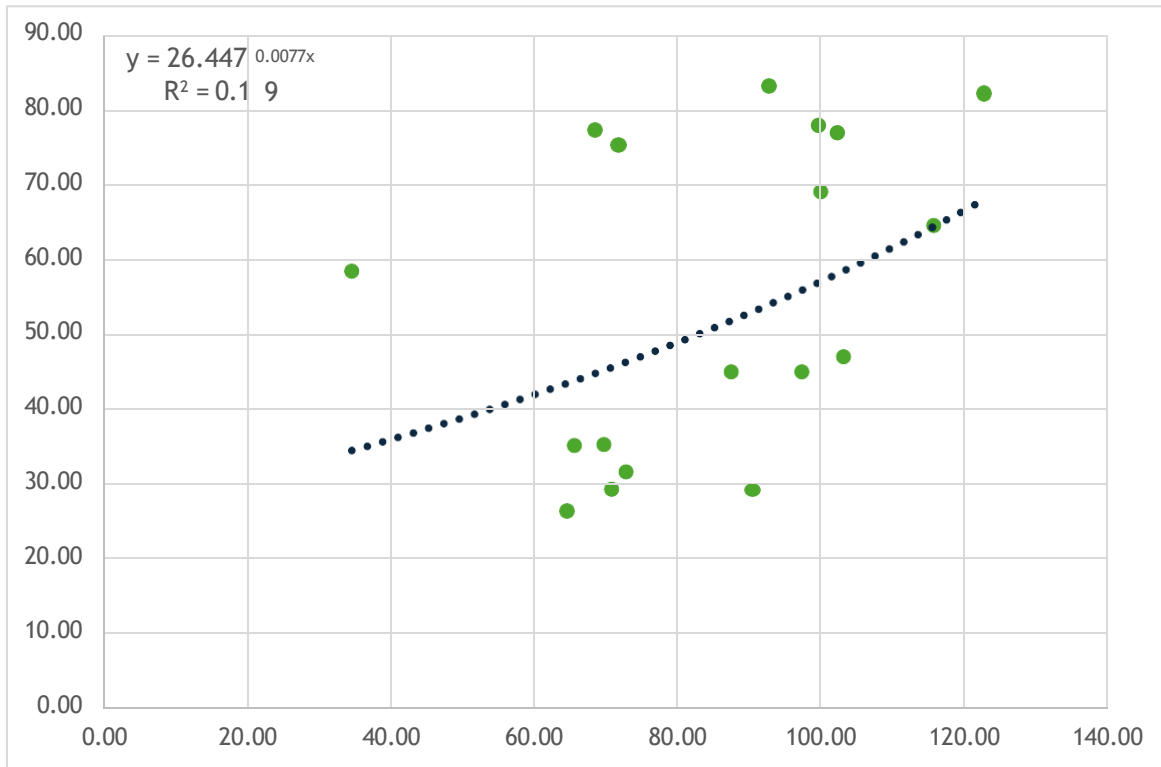
$$CBR = 26.447 \times e^{0.0077E} \quad (24)$$

El parámetro 26,447 es el valor inicial estimado del CBR cuando el Módulo de Young (E) tiende a 0. Mientras que el coeficiente de determinación $R^2 = 0,189$ significa que solo el 18,9% de la variabilidad en los valores de CBR puede explicarse mediante este modelo exponencial. Aunque mejora levemente el ajuste respecto al modelo lineal, aún es bajo para confiar en este modelo como herramienta de predicción.

Este resultado sugiere que, para esta subbase, los datos no siguen una tendencia clara de tipo exponencial, posiblemente por la dispersión de los materiales o condiciones heterogéneas.

Figura 19.

Modelo exponencial entre el CBR y Módulo de Young para la Subbase Clase 3.



4.3.2.8. Modelo regresión logarítmico – Subbase Clase 3

Este modelo representado en la Figura 21 demuestra una relación logarítmica creciente entre el CBR y el Módulo de Young. Es decir, a medida que el Módulo de Young aumenta, el CBR también se incrementa, pero lo hace de manera más lenta y progresiva.

$$CBR = 23.285 \ln(E) - 47.727 \quad (25)$$

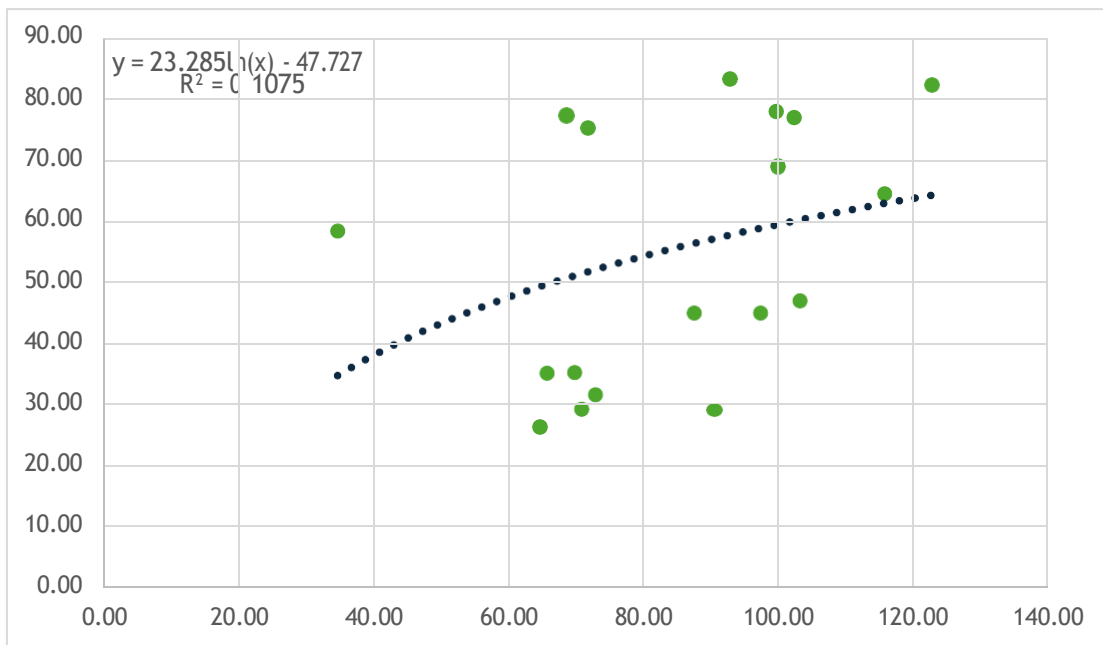
El coeficiente 23,285 indica la pendiente del crecimiento con respecto al logaritmo de E, y el término -47,727 actúa como el valor de ajuste o desplazamiento vertical. Por otro lado, el

coeficiente de determinación $R^2 = 0,1075$ revela que solo el 10,75% de la variación en el CBR puede explicarse por este modelo logarítmico.

Es el modelo con el peor ajuste hasta ahora para la Subbase Clase 3, la gran dispersión de los puntos respecto a la curva de tendencia sugiere que esta forma matemática no representa bien el comportamiento de los datos.

Figura 20.

Modelo logarítmico entre el CBR y Módulo de Young para la Subbase Clase 3.



4.3.2.9. Modelo regresión polinómico de segundo grado – Subbase Clase 3

Esta ecuación es una función cuadrática que describe una relación no lineal entre el CBR y el Módulo de Young. El comportamiento general de este modelo se describe con la siguiente ecuación:

$$CBR = 0.0108 \times E^2 - 1.3679 \times E + 88.409 \quad (26)$$

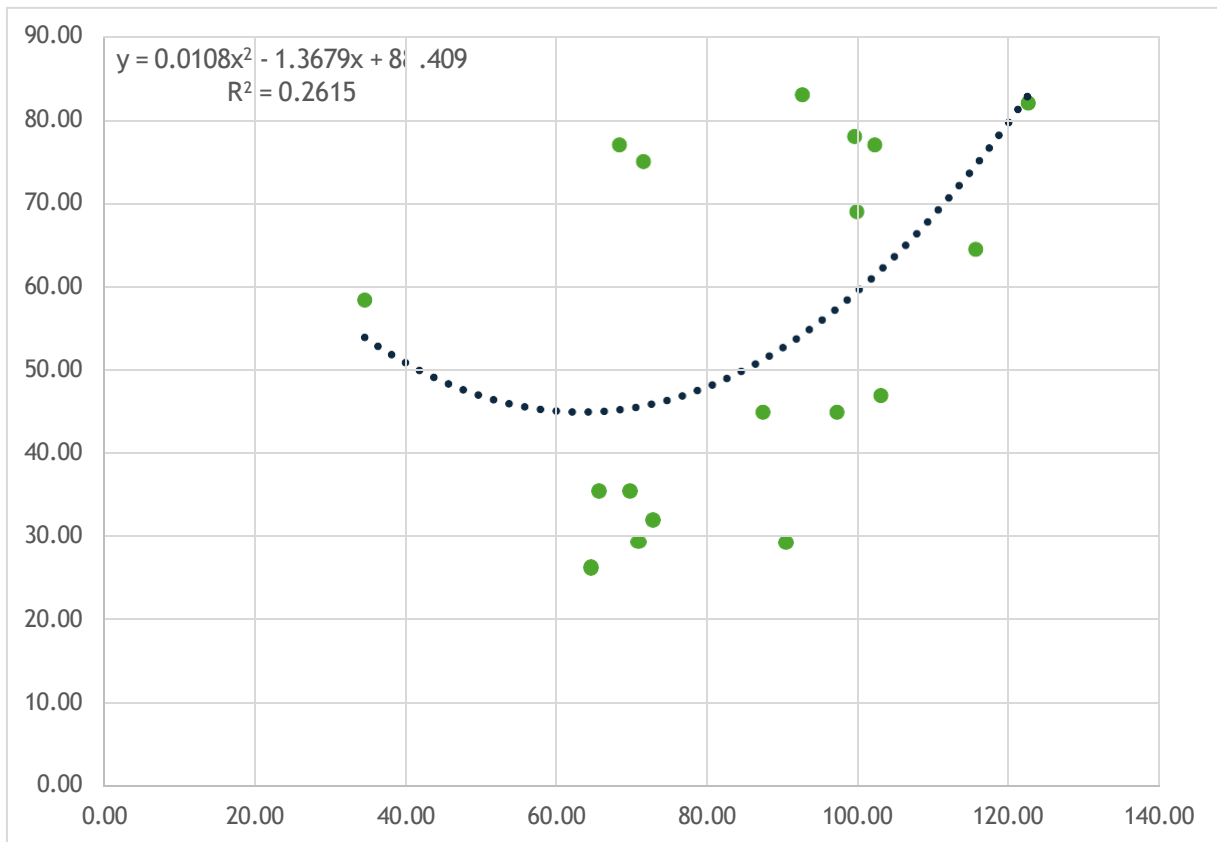
Tiene una curva en forma de “U”, lo que indica una disminución inicial del CBR con el aumento de E, seguido de un incremento posterior. El coeficiente de E^2 es positivo, lo que confirma

la curvatura ascendente del modelo. Este comportamiento puede reflejar que a ciertos niveles de rigidez los materiales no desarrollan necesariamente mayor capacidad de soporte, pero a partir de cierto punto, el CBR mejora.

El coeficiente de determinación $R^2 = 0,2615$ indica que el 26,15% de la variabilidad del CBR se explica por el modelo, ya que es un valor ligeramente mejor que el de los modelos lineal, exponencial y logarítmico aplicados a esta clase. Aunque sigue siendo bajo, este resultado sugiere que una función cuadrática modela mejor los datos de la Subbase Clase 3 que los modelos anteriores. Sin embargo, la dispersión de puntos aún indica una correlación débil a moderada.

Figura 21.

Modelo polinómico de segundo grado entre el CBR y Módulo de Young para la Subbase Clase 3.



4.3.2.10. Modelo regresión polinómico de tercer grado – Subbase Clase 3

Este modelo de tercer grado presentado en la Figura 22 permite observar una curva más flexible que puede capturar mejor las oscilaciones en los datos que los modelos anteriores.

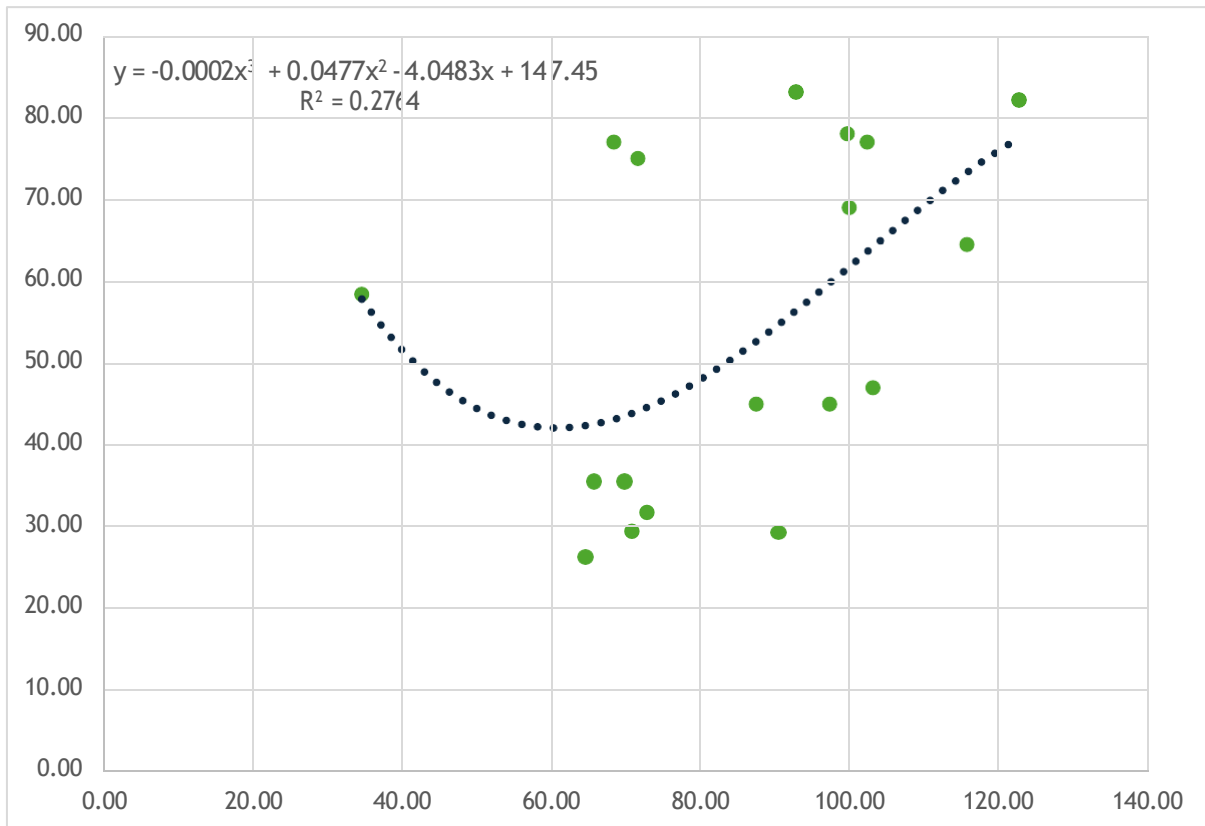
$$CBR = -0.0002 \times E^3 + 0.0477 \times E^2 - 4.0483 \times E + 147.45 \quad (27)$$

La forma de la curva es suavemente ondulada, lo cual sugiere cambios no lineales en la relación entre el CBR Módulo y el de Young. Aunque la curva mejora el ajuste con respecto al modelo cuadrático, la diferencia es pequeña.

El coeficiente de determinación $R^2 = 0,2764$ indica que el modelo explica el 27,64% de la variabilidad del CBR, siendo este el valor más alto de todos los modelos evaluados para esta subbase, pero sigue siendo bajo en términos absolutos.

Figura 22.

Modelo polinómico de tercer grado entre el CBR y Módulo de Young para la Subbase Clase 3.



4.3.2.11. Comparación de resultados por tipo de capa

A continuación, se presenta un resumen de los coeficientes de determinación obtenidos:

-Base Clase 3

Tabla 35.

Ecuaciones modelo y R^2 para la Base Clase 3.

Modelo	R^2	Ecuación resumen
Lineal	0.2989	$CBR = 0,6004 \cdot E - 4,4691$
Exponencial	0.3675	$CBR = 16,772 \cdot e^{(0,0112 \cdot E)}$
Logarítmico	0.2259	$CBR = 47,596 \cdot \ln(E) - 162,18$
Polinómico 2º grado	0.6145	$CBR = 0,0296 \cdot E^2 - 5,0321 \cdot E + 250,81$
Polinómico 3º grado	0.6196	$CBR = -0,0002 \cdot E^3 + 0,0945 \cdot E^2 - 10,877 \cdot E + 419,03$

-Subbase Clase 3

Tabla 36.

Ecuaciones modelo y R^2 para la Subbase Clase 3.

Modelo	R^2	Ecuación resumen
Lineal	0.1645	$CBR = 0,3906 \cdot E + 21,661$
Exponencial	0.1890	$CBR = 26,447 \cdot e^{(0,0077 \cdot E)}$
Logarítmico	0.1075	$CBR = 23,285 \cdot \ln(E) - 47,727$
Polinómico 2º grado	0.2615	$CBR = 0,0108 \cdot E^2 - 1,3679 \cdot E + 88,409$
Polinómico 3º grado	0.2764	$CBR = -0,0002 \cdot E^3 + 0,0477 \cdot E^2 - 4,0483 \cdot E + 147,45$

4.4. Análisis de resultados

En el presente apartado se consolida la información obtenida en los análisis estadísticos, frecuencias, histogramas y modelos de regresión, con el fin de ofrecer una visión integrada del comportamiento de los materiales granulares utilizados en las capas de base y subbase de pavimentos flexibles.

Los resultados de la estadística descriptiva permitieron identificar una considerable variabilidad en los valores de CBR y del Módulo de Young, particularmente en las subbases. Las medidas como la media, mediana, varianza, desviación estándar, rango y rango intercuartílico sirvieron para caracterizar de manera cuantitativa el comportamiento de los materiales por tipo de capa, evidenciando diferencias significativas entre clases. La subbase clase 3, por ejemplo, presentó los mayores niveles de dispersión, mientras que las bases clase 1 y 2 mostraron mayor consistencia.

El análisis de frecuencias e histogramas aportó visualmente una mejor interpretación de la distribución de los datos. Se observó que algunas clases tienden a concentrarse en rangos específicos, mientras que otras muestran una dispersión más amplia. Estas diferencias reflejan el grado de uniformidad del material granular utilizado en cada tipo de capa, lo que puede influir directamente en el desempeño estructural del pavimento.

En cuanto al análisis de regresión, se exploraron diversos modelos funcionales para determinar la relación entre el índice CBR y el Módulo de Young. A nivel general, el modelo de regresión lineal simple presentó un coeficiente de determinación de $R^2 = 0.2262$, lo que indica un ajuste bajo entre ambas variables para todo el conjunto de datos. Esto motivó la evaluación de modelos no lineales (exponencial, logarítmico, polinómicos de segundo y tercer grado), que presentaron mejoras parciales en el valor de R^2 , aunque sin alcanzar niveles óptimos.

Al descomponer el análisis por tipo de capa, se obtuvieron resultados más ajustados, especialmente en la Base Clase 3, donde el modelo polinómico de tercer grado alcanzó un $R^2 = 0.6196$, mostrando una mejora considerable en la predicción. En la Subbase Clase 3, el modelo del mismo tipo registró un $R^2 = 0.2764$, evidenciando un mejor ajuste respecto al análisis general, aunque con una correlación aún limitada.

Estos resultados resaltan que los modelos de predicción del CBR en función del Módulo de Young presentan mayor consistencia cuando se analizan por tipo de capa. Las ecuaciones generadas ofrecen una herramienta estadística útil para estimaciones exploratorias, adaptadas al comportamiento específico de los materiales estudiados

4.4.1. Utilidad de los modelos

La aplicación de modelos de regresión entre el índice CBR y el Módulo de Young tiene como propósito ofrecer herramientas estadísticas de apoyo que permitan caracterizar, comparar y proyectar el comportamiento estructural de materiales granulares en pavimentos flexibles, especialmente en contextos donde no se cuenta con resultados completos de laboratorio o donde se requiere realizar estudios preliminares.

Los modelos desarrollados permiten establecer relaciones funcionales que reflejan tendencias en el comportamiento mecánico de los materiales, estas ecuaciones pueden ser empleadas para realizar estimaciones preliminares del CBR cuando solo se dispone del Módulo de Young, facilitando la toma de decisiones en etapas de diseño básico o diagnóstico de materiales.

Adicionalmente, ayudan para comparar diferentes fuentes de materiales mediante criterios de rigidez y capacidad de soporte, favoreciendo una mejor selección técnica de canteras y evaluar la consistencia de materiales dentro de una misma clase de capa, lo que resulta útil para procesos de control de calidad o validación estadística de datos. También, optimiza tiempos y recursos en

proyectos de infraestructura vial, ya que los modelos pueden sustituir temporalmente ensayos más costosos o de difícil ejecución en campo.

Si bien estos modelos no sustituyen la necesidad de pruebas de laboratorio en fases avanzadas de diseño, representan una alternativa técnica complementaria que puede integrarse en metodologías de diseño por capas o en análisis estructurales elásticos, esta utilidad es especialmente relevante en regiones con limitaciones de equipamiento, presupuesto o acceso a laboratorios, donde se requiere tomar decisiones técnicas con información limitada.

La implementación de estos modelos refuerza la capacidad de análisis y predicción en ingeniería de pavimentos, ofreciendo herramientas versátiles para mejorar la eficiencia y racionalidad en el uso de agregados sin tratamiento.

CAPÍTULO V

5. DISCUSIÓN

5.1. Comparación con estudios previos

A partir del análisis estadístico realizado, se identificó una correlación lineal positiva de intensidad moderada entre el índice CBR y el Módulo de Young, con un coeficiente de correlación $R = 0.4755$ y un coeficiente de determinación $R^2 = 0.2262$, esto significa que aproximadamente el 22.62% de la variabilidad del CBR puede ser explicada por los valores del Módulo de Young mediante un modelo lineal simple, dado este resultado se alinea con investigaciones previas que han trabajado con agregados sin tratamiento, los cuales suelen presentar una alta dispersión en sus propiedades debido a factores como la humedad, la compactación y la heterogeneidad del material.

Debido al bajo nivel de ajuste del modelo lineal, se consideró la implementación de modelos de regresión no lineales para explorar si una forma funcional distinta permitiría mejorar la representación estadística entre ambas variables, para el conjunto general de datos, se probaron modelo exponencial, logarítmico, y polinómicos de segundo y tercer grado. Todos estos modelos presentaron incrementos en el valor de R^2 , siendo el modelo polinómico de tercer grado el que arrojó el mejor ajuste con un $R^2 = 0.3252$. Aunque este valor sigue siendo moderado, evidencia una ligera mejora frente a los modelos más simples.

La mejora en los niveles de ajuste fue más notoria al aplicar los modelos de regresión por tipo de capa. En la Base Clase 3, el modelo polinómico de tercer grado alcanzó un $R^2 = 0.6196$, indicando una capacidad predictiva considerablemente superior. En la Subbase Clase 3, el mismo modelo obtuvo un $R^2 = 0.2764$, superior a todos los modelos alternativos en esa clase, aunque sigue siendo un valor bajo. Estos resultados reflejan que, si bien a nivel general los modelos

presentan limitaciones, su aplicación a grupos homogéneos de materiales puede mejorar sustancialmente la capacidad de predicción.

Este comportamiento también ha sido reportado en estudios previos, donde se destaca que la rigidez y la capacidad de soporte de suelos naturales no siempre responden de forma lineal ante cargas repetidas, especialmente en materiales no tratados. Por tanto, la inclusión de modelos no lineales, en especial los polinómicos, constituye una herramienta valiosa para describir con mayor precisión el comportamiento de los materiales en etapas de diseño preliminar o diagnóstico estructural.

5.2. Análisis crítico de los resultados

El análisis estadístico permitió identificar elementos clave del comportamiento de los materiales granulares utilizados en capas estructurales de pavimentos flexibles. Si bien la regresión lineal general mostró una correlación positiva moderada entre el CBR y el Módulo de Young, con un coeficiente de determinación bajo $R^2 = 0.226$, esto evidenció que dicho modelo no captura con precisión la complejidad de la relación entre ambas variables a nivel global.

Esta limitación puede atribuirse a factores como la alta variabilidad natural de los materiales no tratados, cuyas propiedades físicas y mecánicas como granulometría, contenido de humedad, densidad seca y nivel de compactación fluctúan entre minas e incluso dentro de una misma clase de capa. Además, dado que los datos fueron recopilados de múltiples trabajos de titulación, es posible que existan diferencias en las condiciones de ensayo, métodos de compactación y control de humedad, afectando la consistencia del conjunto de datos.

Otro factor crítico es la combinación de datos de capas estructuralmente distintas (base y subbase), que presentan características mecánicas divergentes, aunque se desarrollaron análisis

diferenciados por tipo de capa, el modelo general pierde capacidad de ajuste al no considerar estas diferencias estructurales.

Frente a este panorama, la incorporación de modelos no lineales representó un avance sustancial. Modelos como el logarítmico, exponencial y polinómicos de segundo y tercer grado lograron un mejor ajuste que la regresión lineal, particularmente cuando se aplicaron de forma específica a clases individuales. En la Base Clase 3, el modelo polinómico de tercer grado alcanzó un $R^2 = 0.6196$, revelando una tendencia estructural clara y consistente. Para la Subbase Clase 3, aunque el valor fue menor con un $R^2 = 0.2764$, también se identificó una mejora frente a otros modelos.

Estos resultados confirman que la relación entre rigidez y capacidad de soporte en materiales granulares no sigue un patrón estrictamente lineal y que, en ciertos casos, un modelo más complejo ofrece una representación más fiel del comportamiento del material. No obstante, incluso con estas mejoras, el grado de dispersión sigue siendo relevante, lo que indica que hay variables adicionales no consideradas que podrían estar influyendo.

Por lo tanto, los modelos estadísticos deben entenderse como herramientas de apoyo, útiles para explorar relaciones entre variables y orientar decisiones técnicas iniciales, pero siempre subordinadas a la validación experimental, su utilidad radica en su capacidad para mostrar tendencias generales o patrones dentro de subconjuntos homogéneos, más que en la predicción exacta de resultados individuales.

5.3. Implicaciones para el diseño estructural de pavimentos

Los resultados obtenidos en este estudio aportan elementos relevantes para el diseño estructural de pavimentos flexibles, especialmente en contextos donde se emplean materiales granulares provenientes de fuentes ecuatorianas. La identificación de relaciones estadísticas entre

el índice CBR y el Módulo de Young, aunque con valores de ajuste limitados en el modelo general, abre la posibilidad de incorporar modelos predictivos como herramientas de apoyo técnico durante la etapa preliminar del diseño.

Uno de los principales beneficios es la posibilidad de estimar el CBR a partir del Módulo de Young, un parámetro que puede obtenerse de manera más rápida y práctica mediante equipos como el GeoGauge, esto es particularmente útil en proyectos con limitaciones de tiempo, presupuesto o acceso a laboratorios especializados, permitiendo realizar aproximaciones de diseño en fases tempranas del proyecto, comparar la rigidez relativa de distintos materiales o fuentes de mina y establecer criterios técnicos para la selección de materiales en campo.

Si bien el modelo de regresión lineal presentó un desempeño modesto ($R^2 = 0.226$), el desarrollo posterior de modelos no lineales mostró mejoras considerables en ciertos subconjuntos. En la Base Clase 3, el modelo polinómico de tercer grado alcanzó un R^2 de 0.6196, mientras que en la Subbase Clase 3 este mismo modelo logró un R^2 de 0.2764, aunque no permiten prescindir de ensayos reales, sugieren que existen patrones específicos dentro de ciertos tipos de material granular que pueden aprovecharse para predicciones más confiables.

Estas relaciones pueden ser aplicadas dentro de modelos estructurales basados en el enfoque de capas elásticas, siempre que se respete el rango de aplicabilidad definido por los datos observados. No obstante, debe especificarse que estas ecuaciones no sustituyen los ensayos de laboratorio necesarios en la fase de diseño definitivo, ya que las decisiones técnicas deben basarse en datos medidos directamente bajo condiciones estandarizadas y representativas.

La utilidad de estas herramientas estadísticas radica en su capacidad para optimizar procesos de planificación, reducir tiempos de evaluación preliminar y ampliar el criterio de análisis cuando se carece de datos completos. Los modelos desarrollados constituyen un insumo técnico

complementario para ingenieros y proyectistas, especialmente en contextos donde el acceso a métodos tradicionales es limitado.

La integración de análisis estadísticos, tanto lineales como no lineales, ofrece nuevas oportunidades para enriquecer el proceso de diseño estructural de pavimentos flexibles, sin desplazar la rigurosidad de los métodos clásicos, sino complementándolos con herramientas adaptadas a la realidad operativa del entorno ecuatoriano.

CAPÍTULO VI

6. CONCLUSIONES

- Se realizó un estudio estadístico detallado entre el índice CBR y el Módulo de Young a partir de los resultados de laboratorio de agregados sin tratamiento provenientes de 18 minas del Ecuador, empleados en capas de base y subbase para pavimentos flexibles.
- El análisis estadístico descriptivo reveló una alta variabilidad en los valores de CBR y Módulo de Young, particularmente en las subbases, reflejando el comportamiento característico de materiales sin tratamiento estabilizante.
- En el análisis estadístico específico por tipo de capa, se realizó una evaluación detallada de la Base Clase 3 y la Subbase Clase 3, calculando medidas como media, mediana, varianza, desviación estándar, rango y rango intercuartílico. Estos resultados permitieron caracterizar cuantitativamente la distribución de los datos, aportando claridad sobre la dispersión y concentración de las muestras de dichas clases.
- La correlación general entre el CBR y el Módulo de Young fue moderada, con un coeficiente de Pearson de $R = 0.4755$, y un coeficiente de determinación de $R^2 = 0.226$, lo que sugiere que el modelo lineal simple tiene un valor exploratorio, pero limitado para predicciones precisas.
- Dado el bajo ajuste del modelo lineal, se implementó un análisis complementario con modelos no lineales (logarítmico, exponencial, polinómico de segundo y tercer grado) tanto a nivel general como por tipo de capa, observándose mejoras en el ajuste, especialmente con el modelo polinómico de tercer grado.

- A nivel general, el mejor modelo fue el modelo polinómico de tercer grado, con un coeficiente de determinación de $R^2 = 0.3041$, superior a los obtenidos por los modelos lineal, logarítmico o exponencial. Aun cuando no supera el umbral deseable de $R^2 \geq 0.5$, representa la alternativa más robusta dentro del conjunto global de datos.
- Por tipo de capa, la Base Clase 3 mostró el mejor desempeño estadístico con el modelo polinómico de tercer grado, obteniendo un $R^2 = 0.6196$, lo que indica un ajuste moderadamente alto, mientras que en la Subbase Clase 3, el mejor modelo fue también el polinómico de tercer grado, con un $R^2 = 0.2764$, valor que, aunque más bajo, sigue siendo superior al resto de los modelos aplicados en esa clase.
- Se confirmó que los modelos no lineales capturan mejor la relación entre CBR y Módulo de Young en rangos amplios de variación, aunque sin alcanzar niveles altos de predicción, lo cual refuerza la necesidad de aplicar estos modelos con criterio técnico y dentro del rango de los datos observados.
- Todos los modelos generados deben ser considerados herramientas complementarias en el diseño estructural preliminar de pavimentos, particularmente útiles cuando no se dispone del ensayo CBR en campo o laboratorio, pero nunca como sustituto definitivo del mismo.
- La propuesta metodológica desarrollada en esta tesis puede ser replicada o ampliada con nuevos datos, permitiendo el perfeccionamiento de modelos predictivos y su futura aplicación a nivel regional o nacional para optimizar el uso de materiales granulares en obras viales.

7. RECOMENDACIONES

- Se recomienda utilizar los modelos estadísticos generados (lineales y no lineales) como herramientas de apoyo preliminar en proyectos de diseño de pavimentos flexibles, especialmente en etapas de diagnóstico, planificación y selección de materiales, pero no como reemplazo del ensayo CBR real en fases definitivas.
- El modelo polinómico de tercer grado resultó ser el de mejor desempeño tanto en la base clase 3 como en la base general de datos, por lo que puede adoptarse como ecuación de referencia para estimaciones comparativas, siempre dentro del rango de valores observados y bajo validación técnica.
- En futuras investigaciones se sugiere aumentar el número de muestras por tipo de capa, mejorar la uniformidad en la obtención de los datos y normalizar las condiciones de ensayo, con el fin de reducir la dispersión y fortalecer la confiabilidad de los modelos generados.
- Es recomendable incluir variables adicionales en modelos lineales o no lineales avanzados, como la abrasión de Los Ángeles (parámetro que evalúa el desgaste y la resistencia al desintegramiento de los agregados), ya que su incorporación podría mejorar el valor explicativo y la precisión de las estimaciones, especialmente en estudios relacionados con la durabilidad y el comportamiento mecánico de los materiales granulares.
- Se debe continuar el análisis por tipo de capa, como se hizo con la Base Clase 3 y la Subbase Clase 3, ya que los modelos específicos mostraron un mejor ajuste que los modelos generales, especialmente en materiales con menor variabilidad.

- La base de datos obtenida de las 18 minas puede convertirse en un insumo técnico regional para la evaluación de materiales granulares, por lo que se recomienda su ampliación y sistematización en futuras investigaciones o propuestas institucionales.
- El uso de herramientas de medición de rigidez superficial in situ, como el GeoGauge, debe ser promovido como alternativa práctica para obtener el Módulo de Young en campo, siempre que esté acompañado de un análisis estadístico que justifique su aplicación.
- Finalmente, se aconseja que esta metodología y sus resultados se presenten ante entidades como el MTOP o gobiernos locales, con el objetivo de generar una base técnica más adaptada a la realidad nacional, optimizando así la gestión de materiales para pavimentación.

8. REFERENCIAS

- AASHTO. (1993). *AASHTO Guide for Design of Pavement Structures*. American Association of State Highway and Transportation Officials.
- Alvarado, M. (2019). *Comparación técnica entre los ensayos de laboratorio de CBR y Módulo de Young para base y sub base. Caso de estudio Mina Mulaló-Cotopaxi*. Pontificia Universidad Católica del Ecuador.
- Alvear, M. (2019). *Comparación técnica entre los ensayos de laboratorio de módulo Young y CBR para base y sub base. Caso de estudio mina San Luis Cananvalle (Tabacundo)*. Pontificia Universidad Católica del Ecuador.
- ASTM International. (2020). *ASTM D1883 – Standard Test Method for CBR (California Bearing Ratio) of Laboratory-Compacted Soils*. West Conshohocken, PA, USA.

- ASTM International. (2020). *ASTM D6758 – Standard Test Method for Measuring Stiffness and Apparent Modulus of Subgrade Soils Using the Portable Impulse Plate Load Test Device (GeoGauge)*. West Conshohocken, PA, USA.
- Braja M. Das. (2011). *Principios de Ingeniería de Cimentaciones* (7ª ed.). Cengage Learning.
- Coronel, G. (2019). *Comparación técnica entre los ensayos de laboratorio del Módulo de Young y CBR para base y sub base. Caso de estudio: Mina Punto Azul (Ibarra-Imbabura)*. Pontificia Universidad Católica del Ecuador.
- Cox, M., & Gómez, R. (2019). *Comparación técnica entre los ensayos de laboratorio de Módulo de Young y C.B.R. para base y sub base. Casos de estudio Mina de Macas (Macas-Morona Santiago) y Mina del Coca (Coca-Orellana)*. Pontificia Universidad Católica del Ecuador.
- Echeverría, R., & Bastidas, T. (2019). *Comparación técnica entre los ensayos de laboratorio de Módulo de Young y CBR para base y sub base. Casos de estudio de Minas La Chimba y Loma de Cuniburo (Consejo Provincial de Pichincha)*. Pontificia Universidad Católica del Ecuador.
- López, J., & García, A. (2015). Caracterización de materiales granulares para capas estructurales de pavimento. *Revista Ingeniería y Desarrollo*, 33(2), 145–158.
<https://doi.org/10.14482/inde.33.2.5806>
- Maila, M. (2022). *Comparación técnica entre los ensayos de laboratorio de módulo de Young y C.B.R. para base y sub base. Casos de estudio Mina Segundo (Latacunga-Cotopaxi)*. Pontificia Universidad Católica del Ecuador.
- Meneses, M. (2023). *Comparación técnica entre los ensayos de laboratorio de Módulo de Young y CBR para bases y subbases, caso de estudio mina: “Doña Meche”, ubicada en el cantón de Esmeraldas provincia de Esmeraldas*. Pontificia Universidad Católica del Ecuador.

- Ministerio de Transporte y Obras Públicas del Ecuador. (2012). *Normas Ecuatorianas de la Vialidad (NEVI 12 - MTOP)*. Quito, Ecuador.
- Ocaña, C. (2019). *Comparación técnica entre los ensayos de laboratorio de Modulo de Young y CBR para base y sub base. Caso de estudio: Mina Wiliselzu CIA. LTDA. (Puyo, Pastaza)*. Pontificia Universidad Católica del Ecuador.
- Palacios, D., & Panchi, R. (2019). *Comparación técnica entre los ensayos de laboratorio de Módulo de Young y CBR para bases y sub bases, casos de estudio minas: Malca 3 y Malca 4, ubicadas en el cantón Catamayo provincia de Loja*. Pontificia Universidad Católica del Ecuador.
- Pazmiño, G. (2019). *Comparación técnica entre los ensayos de laboratorio de Módulo de Young y CBR para base y sub base. Casos de estudio Mina Compañía JHV (Tena)*. Pontificia Universidad Católica del Ecuador.
- Ríos, C. (2019). *Comparación técnica entre los ensayos de laboratorio Módulo de Young y C.B.R. de laboratorio para base y subbase de la Mina Picoazá (Portoviejo-Manabí)*. Pontificia Universidad Católica del Ecuador.
- Tafur, A. (2020). *Comparación técnica entre los ensayos de laboratorio de Módulo de Young y CBR para base y sub base. Caso de estudio: Mina Materiales Pétreos R/R (Cantera Ramirez)*. Pontificia Universidad Católica del Ecuador.
- Urquiza, P. (2019). *Comparación técnica entre los ensayos de laboratorio de Módulo de Young y C.B.R. para bases y subbases, caso de estudio: Cantera San Joaquín (provincia de Cotopaxi, sector Santa Rita)*. Pontificia Universidad Católica del Ecuador.

Vaca, C. (2019). *Comparación técnica entre los ensayos de laboratorio de CBR y Modulo de Young para base y subbase. Caso de estudio: Mina Vargas Soria (Baños)*. Pontificia Universidad Católica del Ecuador.

Zambrano, J. (2019). *Comparación técnica entre los ensayos de laboratorio de CBR y Módulo de Young para base y subbase. Caso de estudio: Mina La China (Quevedo)*. Pontificia Universidad Católica del Ecuador.

9. ANEXOS

9.1. Correlación entre el CBR y Módulo de Young para materiales de Base y Subbase

Figura 23.

Comparación de los coeficientes de regresión lineal entre CBR y Módulo de Young para la Base Clase 1.

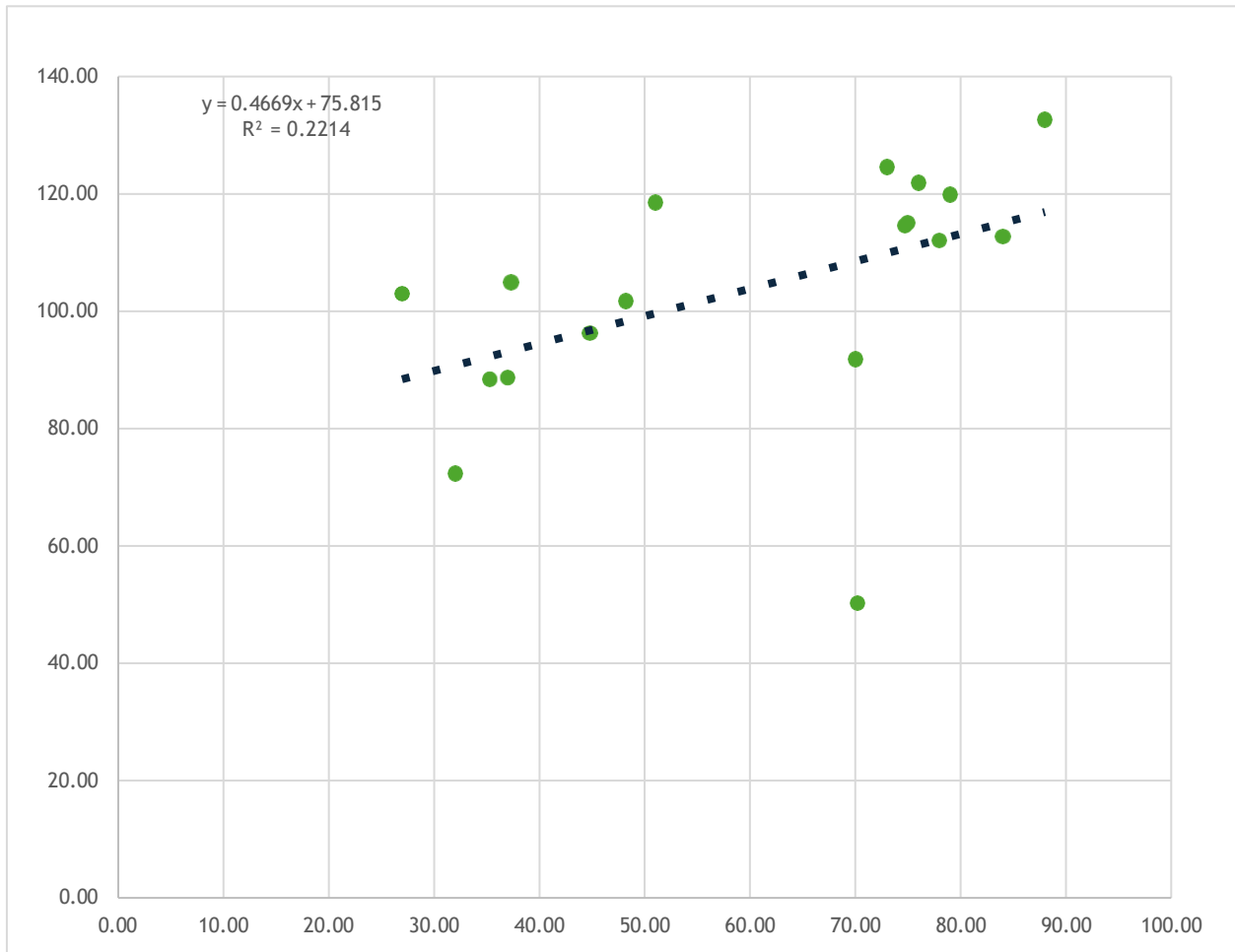


Figura 24.

Comparación de los coeficientes de regresión lineal entre CBR y Módulo de Young para la Base

Clase 2.

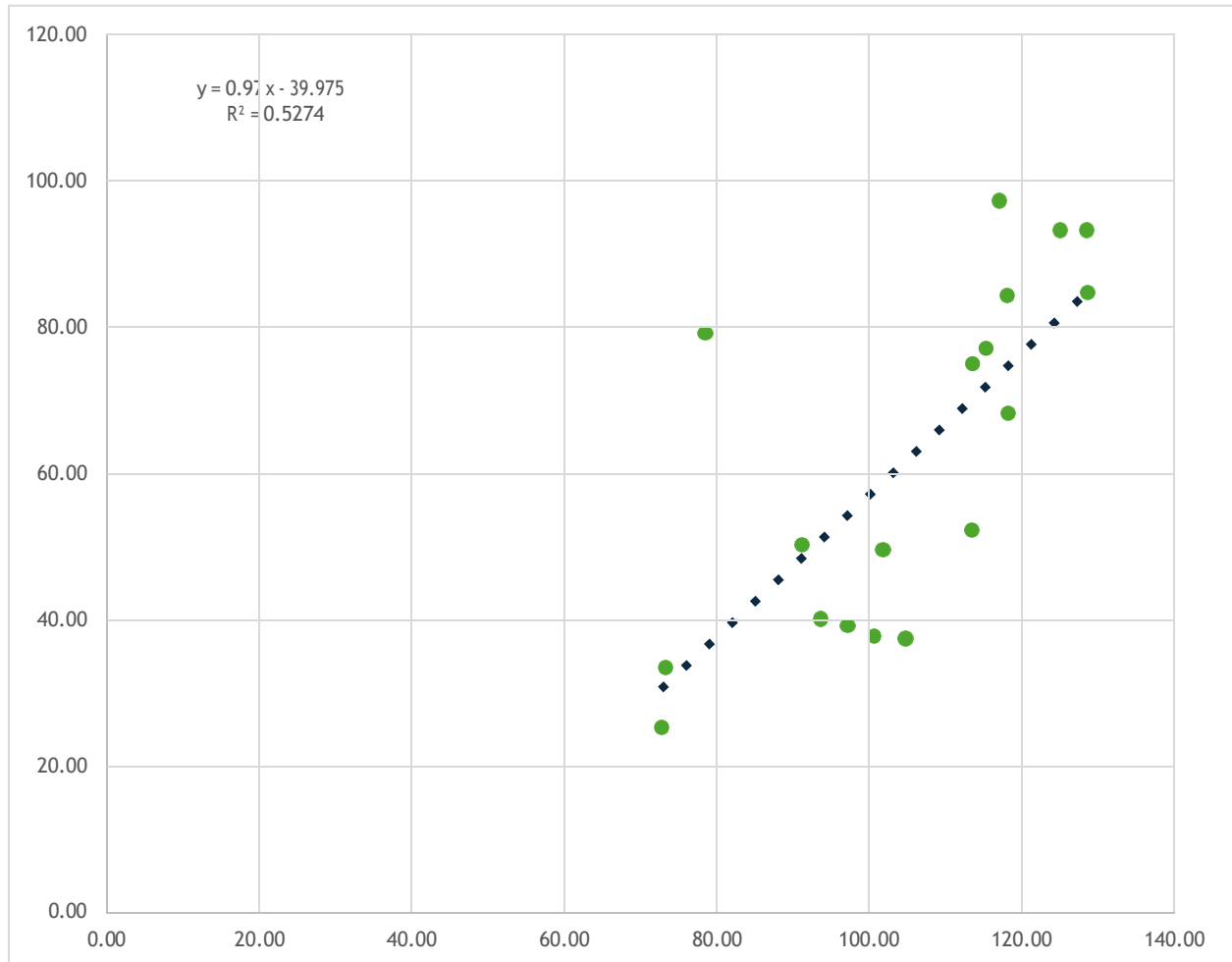


Figura 25.

Comparación de los coeficientes de regresión lineal entre CBR y Módulo de Young para la Base

Clase 3.

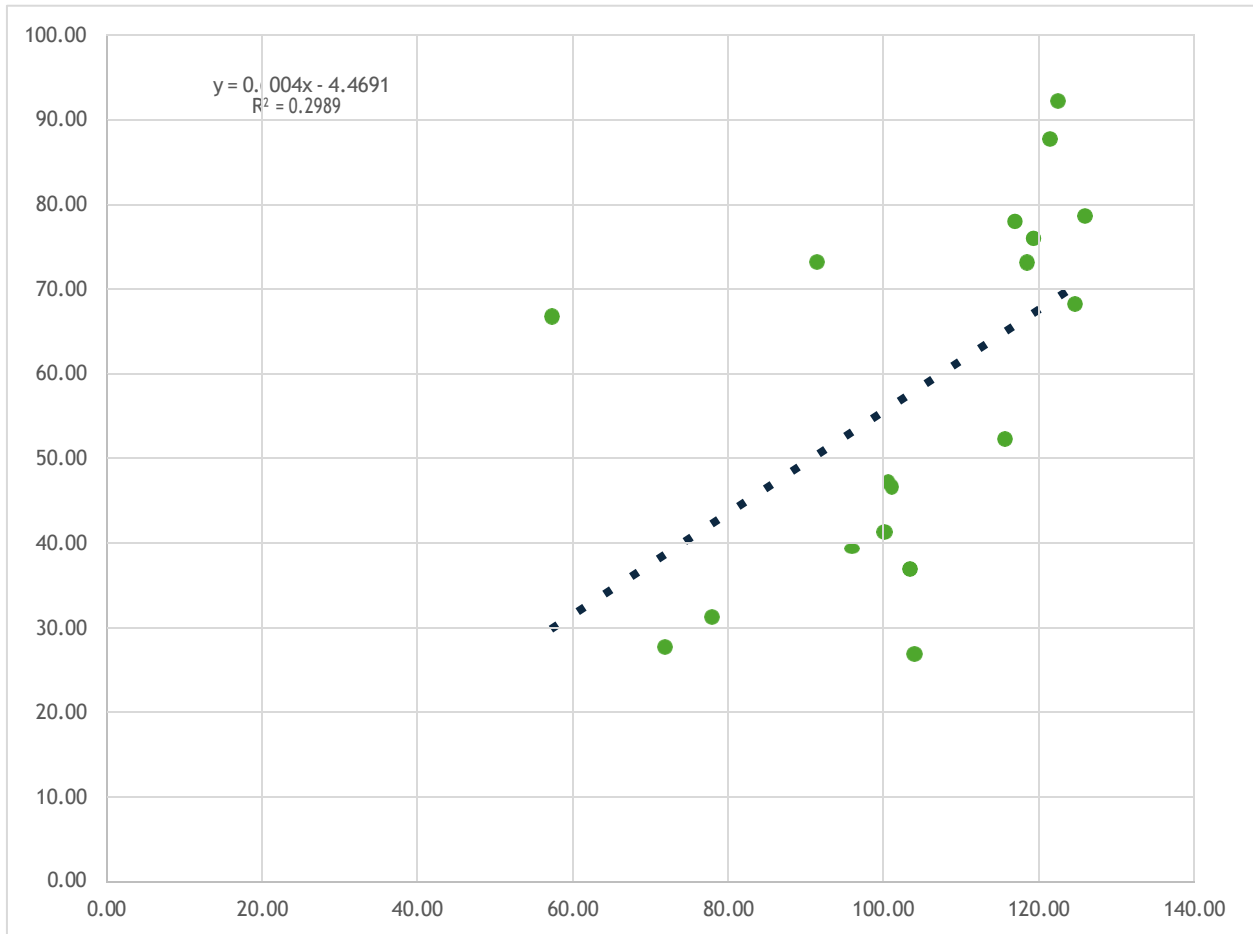


Figura 26.

Comparación de los coeficientes de regresión lineal entre CBR y Módulo de Young para la Base

Clase 4.

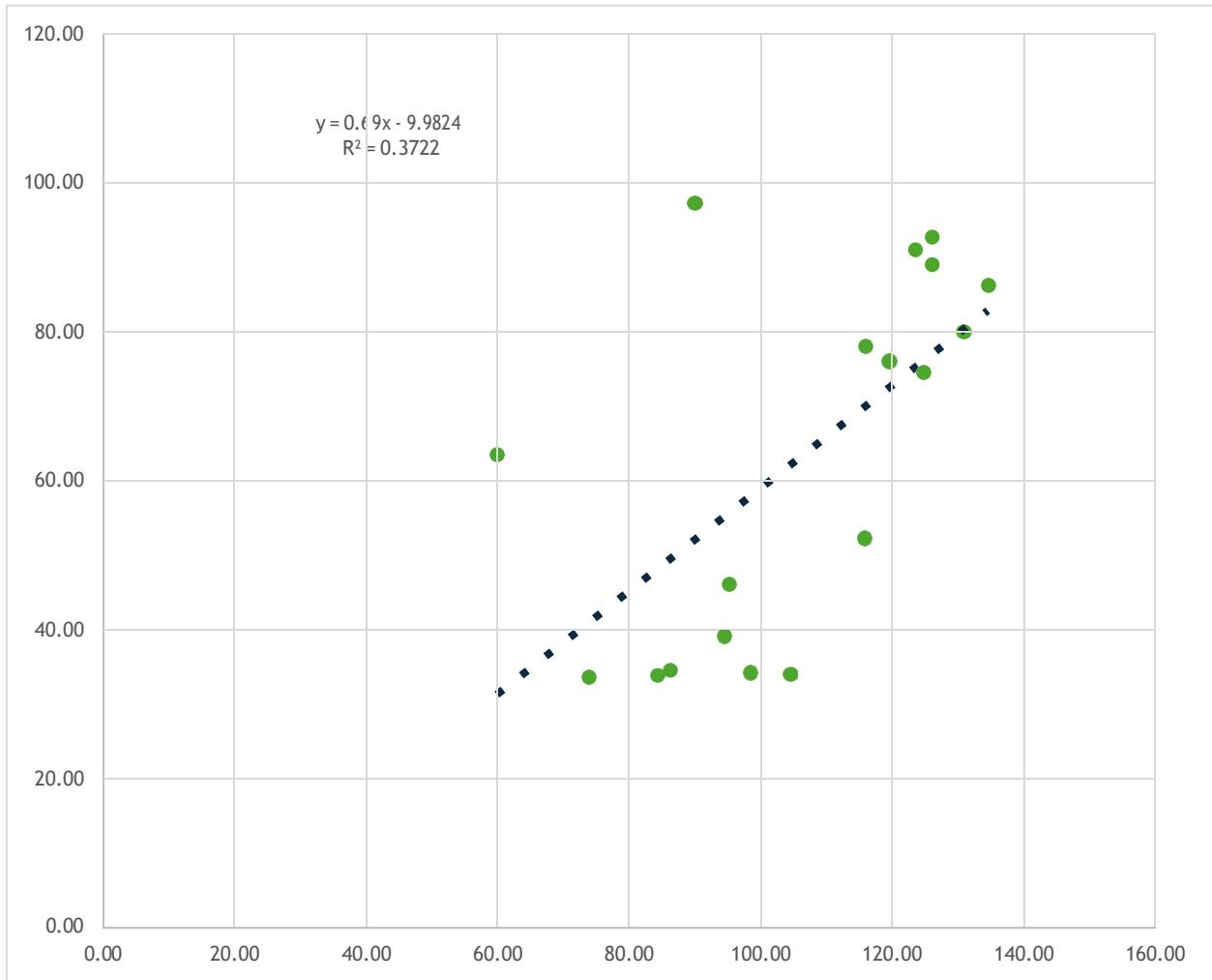


Figura 27.

Comparación de los coeficientes de regresión lineal entre CBR y Módulo de Young para la Subbase Clase 1.

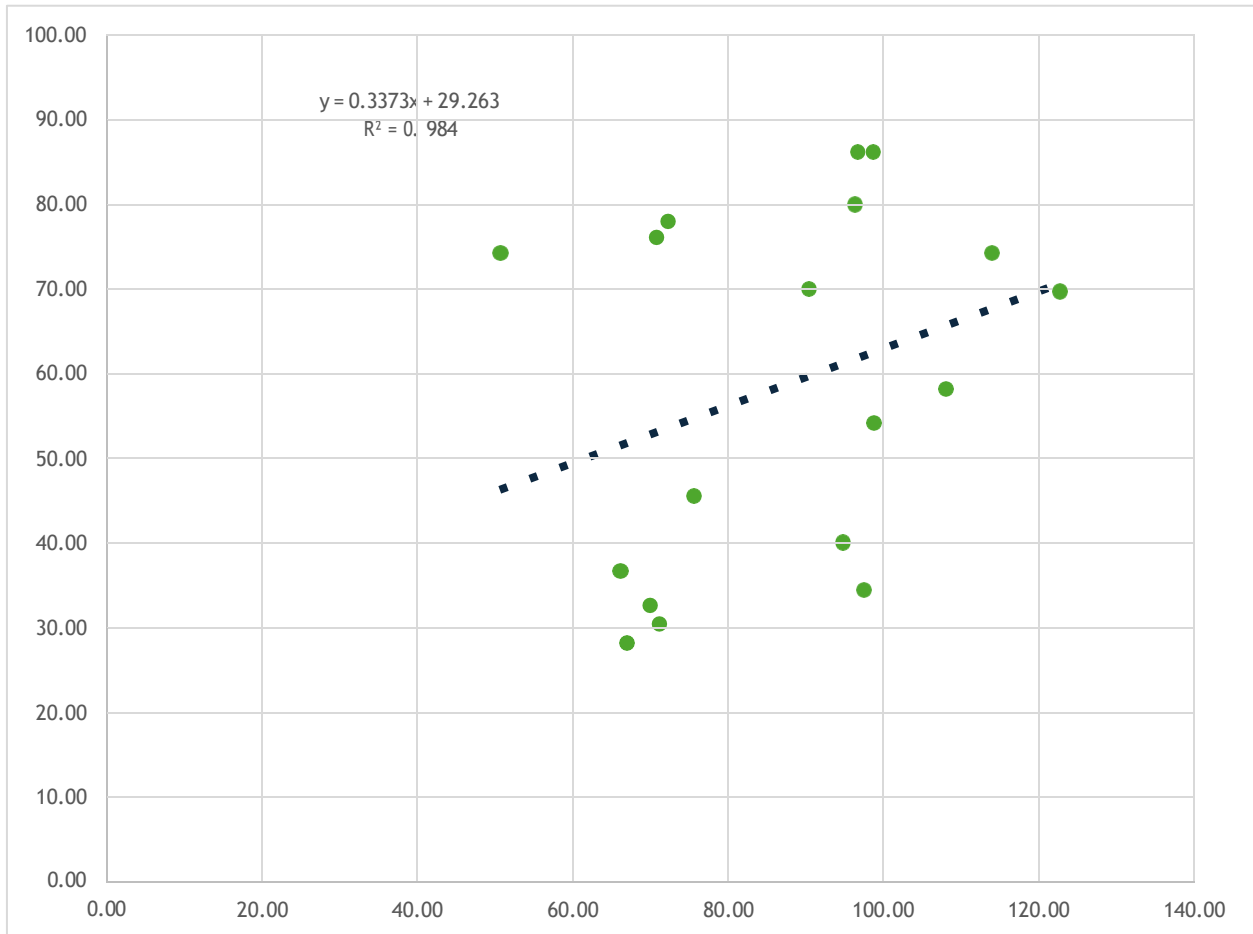


Figura 28.

Comparación de los coeficientes de regresión lineal entre CBR y Módulo de Young para la Subbase Clase 2.

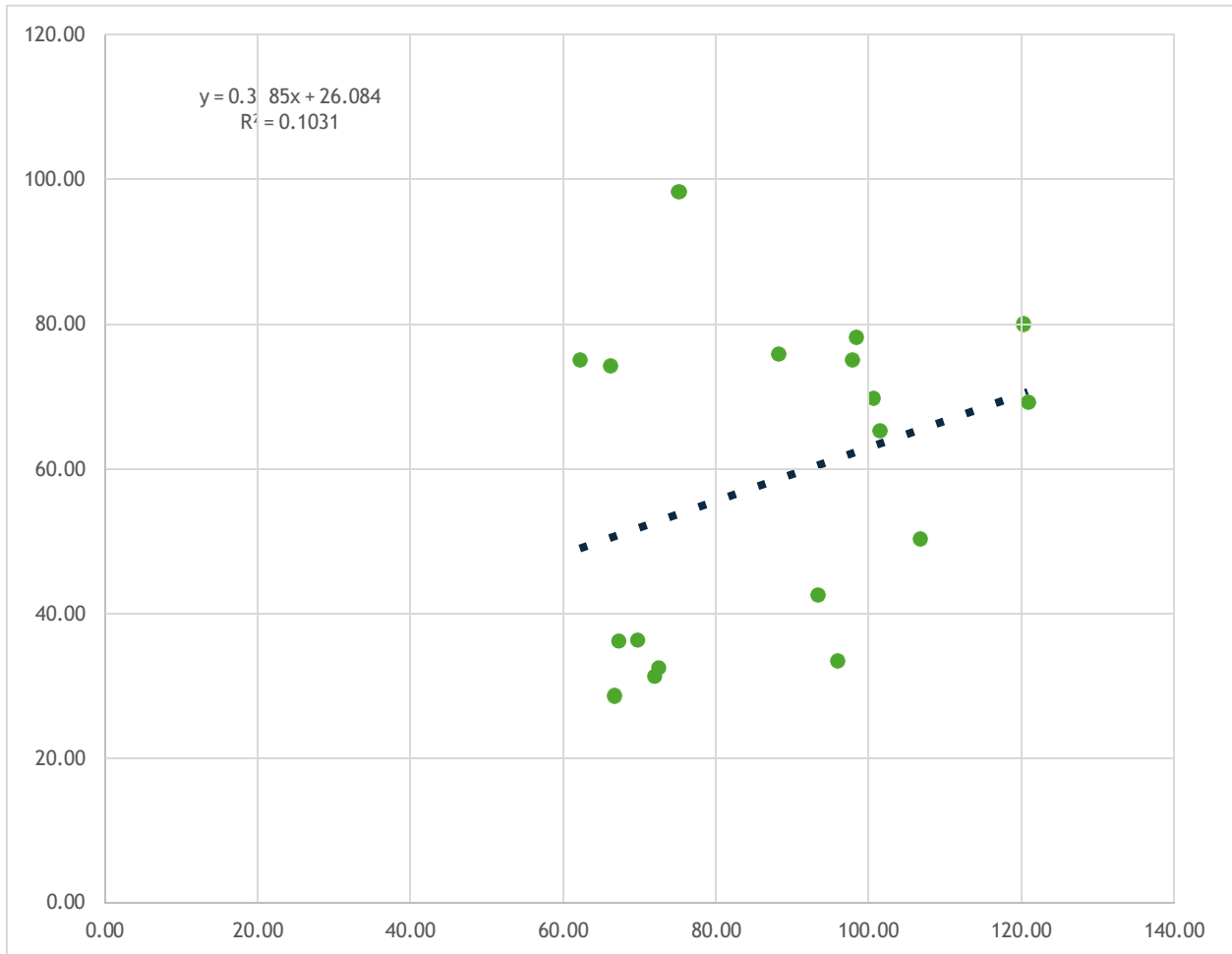


Figura 29.

Comparación de los coeficientes de regresión lineal entre CBR y Módulo de Young para la Subbase Clase 3.

